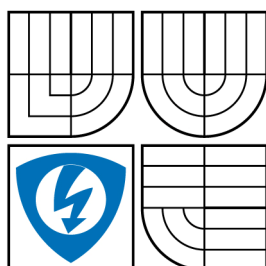


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

PROUDY VE STŘEDNÍCH VODIČÍCH NAPÁJECÍCH SÍTÍ A JEJICH DŮSLEDKY

NEUTRAL CONDUCTOR LOADING IN DISTRIBUTION SYSTEMS. ORIGIN AND EFFECT.

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PETR VALKOUN

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ DRÁPELA, Ph.D.

BRNO 2008

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

**PROUDY VE STŘEDNÍCH VODIČÍCH
NAPÁJECÍCH SÍTÍ A JEJICH DŮSLEDKY**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

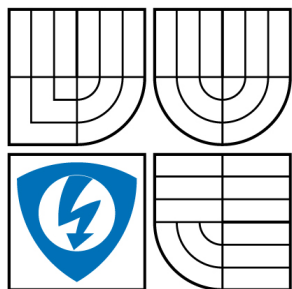
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PETR VALKOUN

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor

Elektroenergetika

Student: Valkoun Petr Bc.

ID: 88946

Ročník: 2

Akademický rok: 2007/2008

NÁZEV TÉMATU:

Proudy ve středních vodičích napájecích sítí a jejich důsledky

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Skládání proudů ve středním vodiči, mezní případy
2. Důsledky proudu ve středním vodiči
3. Tepelné namáhání vodičů
4. Možnosti chránění proti přetížení a přerušení středního vodiče

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vedoucího

Termín zadání: 17.12.2007

Termín odevzdání: 28.5.2008

Vedoucí práce: Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan

Jméno a příjmení: Bc. Petr Valkoun

Bytem: Veslařská 159, 63700, Brno

Narozen (datum a místo): 5.9.1983, Brno

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií,

se sídlem Údolní 244/53, 602 00 Brno,

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

☐ disertační práce

☒ diplomová práce

☐ bakalářská práce

☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

.....
(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP:	Proudy ve středních vodičích napájecích sítí a jejich důsledky
Vedoucí/ školitel VŠKP:	Ing. Jiří Drápela, Ph.D.
Ústav:	Ústav elektroenergetiky
Datum obhajoby VŠKP:	10.6.2008

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v * :

☒ tištěné formě – počet exemplářů 1

☒ elektronické formě – počet exemplářů 2

* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☐ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☒ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Bibliografická citace práce:

VALKOUN, P. Proudý ve středních vodičích napájecích sítí a jejich důsledky. Diplomová práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2008, 70 stran.

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

Zároveň bych na tomto místě chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Drápelovi Ph.D. za cenné rady a připomínky k mé práci, poskytnutou literaturu a svým rodičům za podporu během celé doby mého studia.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky**

Diplomová práce

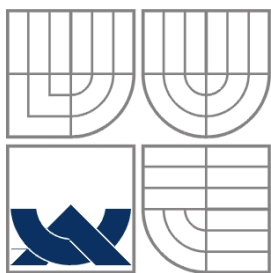
Proudy ve středních vodičích napájecích sítí a jejich důsledky

Bc. Petr Valkoun

vedoucí: Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2008

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



Faculty of Electrical Engineering and Communication

Department of Electrical Power Engineering

Master's Thesis

Neutral conductor loading in distribution systems. Origin and effect.

by

Bc. Petr Valkoun

Supervisor: Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

Brno University of Technology, 2008

Brno

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá vznikem harmonických proudů, jejich rozdělením do souměrných složek a jejich vlivem na střední vodič napájecích sítí. Analyzuje zvýšení tepelného namáhání napájecích vedení a deformace napájecího napětí v důsledku nulových složek harmonických proudů v napájecích sítích a stanovuje možnosti chránění proti přetížení a přerušení středního vodiče.

KLÍČOVÁ SLOVA: harmonické proudy; deformace proudu; nulová složka proudu; přetížení středního vodiče; THD; CDF

ABSTRACT

This work deals with an origin of the harmonic currents, their classification into symmetrical components and their influence on neutral conductor in distribution systems. It analyses the heat strain increase in distribution cables and distortion of supply tension in consequence of harmonic zero component flows in distribution system and it provides possibilities of neutral conductor overload and break-in protection.

KEY WORDS: harmonics; current distortion; zero current component; neutral wire overloading; THD; CDF

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	13
SEZNAM TABULEK	15
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	16
1 ÚVOD	19
2 HARMONICKÉ PROUDY	19
2.1 DEFINICE	19
2.2 PŘÍČINY VZNIKU HARMONICKÝCH A JEJICH POPIS	20
2.3 MATEMATICKÝ POPIS – FOURIEROVA ŘADA	21
2.4 ČINITEL ZKRESLENÍ.....	22
2.5 DEFINICE DALŠÍCH TERMÍNŮ	23
2.6 NEJČASTĚJŠÍ REÁLNÉ ZDROJE HARMONICKÝCH V SÍTI	23
2.6.1 JEDNOFÁZOVÉ ZÁTĚŽE.....	23
2.6.2 TROJFÁZOVÉ ZÁTĚŽE.....	26
3 ŠÍŘENÍ A KUMULACE HARMONICKÝCH.....	28
4 ZATÍŽENÍ STŘEDNÍHO VODIČE	30
5 CELKOVÉ ZATÍŽENÍ NAPÁJECÍHO VEDENÍ.....	33
6 DŮSLEDKY HARMONICKÝCH PROUDŮ.....	37
6.1 PRIMÁRNÍ DŮSLEDKY HARMONICKÝCH PROUDŮ	37
6.1.1 TRANSFORMÁTORY.....	37
6.1.2 TELEKOMUNIKACE	37
6.1.3 PŘETÍŽENÍ STŘEDNÍHO VODIČE	38
6.2 SEKUNDÁRNÍ DŮSLEDKY HARMONICKÝCH PROUDŮ	38
6.2.1 KONDENZÁTOROVÉ BATERIE.....	38
6.2.2 MOTORY	39
6.2.3 PORUCHY PŘI PRŮCHODU NULOU	39
7 TEPELNÉ NAMÁHÁNÍ VODIČŮ	40
7.1 AMPLITUDOVÁ A FÁZOVÁ SPEKTRA ZÁKLADNÍCH PRVKŮ.....	41
7.1.1 ŽÁROVKA SE SNIŽOVACÍM TRANSFORMÁTOREM 230/12V, 50Hz, 60VA.....	41
7.1.2 KOMPAKTNÍ ZÁŘIVKA S INDUKČNÍM PŘEDŘADNÍKEM	41
7.1.3 HALOGENIDOVÁ VÝBOJKA 400W S INDUKČNÍM PŘEDŘADNÍKEM.....	42
7.1.4 USMĚRŇOVAČ.....	43
7.1.5 OSOBNÍ POČÍTAČ.....	44
7.1.6 UPS – ZDROJ NEPŘETRŽITÉHO NAPÁJENÍ.....	44
7.1.7 ŽÁROVKA 100W	45
7.2 VÝSLEDNÉ ZÁVISLOSTI.....	46
7.2.1 ZÁVISLOST $I_{N,F}$ NA $THD_{I,ČSN}$	46
7.2.2 ZÁVISLOST $I_{N,F}$ NA $I_{3,H\%}$	47
7.2.3 ZÁVISLOST $I_{N,F}$ NA $I_{3\%}$	48
7.2.4 VYHODNOCENÍ ZÁVISLOSTÍ $I_{N,F}$	49

7.2.5 ZÁVISLOST CDF_K NA $THD_{I,ČSN}$	50
7.2.6 ZÁVISLOST CDF_K NA $I_{3,H\%}$	51
7.2.7 ZÁVISLOST CDF_K NA $I_{3\%}$	52
7.2.8 ZÁVISLOST CDF_N NA $THD_{I,ČSN}$	53
7.2.9 ZÁVISLOST CDF_N NA $I_{3,H\%}$	54
7.2.10 ZÁVISLOST CDF_N NA $I_{3\%}$	55
7.2.11 VÝSLEDNÁ ZÁVISLOST CDF NA $THD_{I,ČSN}$	56
7.2.12 VÝSLEDNÁ ZÁVISLOST CDF NA $I_{3,H\%}$	57
7.2.13 VÝSLEDNÁ ZÁVISLOST CDF NA $I_{3\%}$	58
8 MOŽNOSTI CHRÁNĚNÍ PROTI PŘETÍŽENÍ STŘEDNÍHO VODIČE	59
8.1 V SOUSTAVÁCH S PŘÍMO UZEMNĚNÝM UZLEM (SÍŤE TN NEBO TT)	59
8.2 V SOUSTAVÁCH, VE KTERÝCH NENÍ UZEL PŘÍMO UZEMNĚN (SÍŤE IT)	59
8.3 OPATŘENÍ K OMEZENÍ HARMONICKÝCH	59
8.3.1 TLUMIVKA NA VSTUPU/VÝSTUPU USMĚRŇOVAČE	60
8.3.2 VÍCEPULZNÍ USMĚRŇOVAČE	60
8.3.3 PASIVNÍ FILTR	60
8.3.4 AKTIVNÍ FILTR	61
9 ZÁVĚR	63
POUŽITÁ LITERATURA	66

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Základní harmonická deformovaná 3. harmonickou složkou [7].....	19
Obr. 2: VA charakteristika lineárního spotřebiče [1].....	20
Obr. 3: Nelineární zátěž [1]	20
Obr. 4: Skládání vln [1]	21
Obr. 5: Konverze DC na DC [1]	24
Obr. 6: Křivka proudu a spektrum spínaného napájecího zdroje [1]	24
Obr. 7: Křivka proudu a spektrum zářivky s magnetickým předřadníkem [1]	25
Obr. 8: Křivka proudu a spektrum zářivky s elektrickým předřadníkem [1]	26
Obr. 9: Křivka proudu a spektrum výkonového měniče [1]	27
Obr. 10: Křivka proudu a spektrum výkonového měniče s modulací [1]	27
Obr. 11: Ekvivalentní obvod pro nelineární zátěž [4]	29
Obr. 12: Fázorové diagramy a) první b) třetí c) páté harmonické složky proudu při třífázovém symetrickém odběru a jejich projev v souměrných soustavách [4].....	30
Obr. 13: Příklad sčítání 1. a 3. harmonické proudu ve středním vodiči při souměrném odběru v souměrné síti [4].....	31
Obr. 14: Diracův impuls [4]	32
Obr. 15: Poměrná hodnota velikosti proudu středním vodičem při definované kombinaci lineární a nelineární zátěže v závislosti na nZ, S [4]	36
Obr. 16: Induktivní vazba mezi středním vodičem a telekomunikační linkou [1].....	38
Obr. 17: Proud kondenzátoru s rezonancí 11. harmonickou	39
Obr. 18: Fázové a amplitudové spektrum žárovky se snižovacím transformátorem [4]	41
Obr. 19: Fázové a amplitudové spektrum kompaktní zářivky [4]	41
Obr. 20: Fázové a amplitudové spektrum halogenidové výbojky [4]	42
Obr. 21: Fázové spektrum usměrňovače	43
Obr. 22: Amplitudové spektrum usměrňovače	43
Obr. 23: Fázové a amplitudové spektrum osobního počítače	44
Obr. 24: Fázové a amplitudové UPS.....	44
Obr. 25: Závislost $i_{N,F}$ na $THD_{I,ČSN}$	46
Obr. 26: Závislost $i_{N,F}$ na $I_{3,h\%}$	47
Obr. 27: Závislost $i_{N,F}$ na $i_{3\%}$	48
Obr. 28: Porovnání aproximujících funkcí jednotlivých závislostí.....	49
Obr. 29: Závislost CDF_K na $THD_{I,ČSN}$	50
Obr. 30: Závislost CDF_K na $i_{3,h\%}$	51

<i>Obr. 31: Závislost CDF_K na $i_3\%$.....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 32: Závislost CDF_N na $THD_{I,\check{C}SN}$.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 33: Závislost CDF_N na $I_{3,h}\%$.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 34: Závislost CDF_N na $I_{3\%}$.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 35: Závislost CDF na $THD_{I,\check{C}SN}$.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 36: Závislost CDF na $I_{3h}\%$.....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 37: Závislost CDF na $I_{3\%}$.....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 38: Pasivní filtr</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 39: Derivační aktivní filtry [12]</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 40: Sériové aktivní filtry [12]</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 41: Kombinované aktivní filtry [12]</i>	<i>62</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab.1 Vybrané typy zátěží</i>	<i>40</i>
<i>Tab.2 Vypočtené hodnoty pro žárovku se snižovacím transformátorem.....</i>	<i>41</i>
<i>Tab.3 Vypočtené hodnoty pro kompaktní zářivku</i>	<i>42</i>
<i>Tab.4 Vypočtené hodnoty pro kompaktní zářivku</i>	<i>42</i>
<i>Tab.5 Vypočtené hodnoty pro usměrňovač</i>	<i>43</i>
<i>Tab.6 Vypočtené hodnoty pro osobní počítač</i>	<i>44</i>
<i>Tab.7 Vypočtené hodnoty pro UPS</i>	<i>45</i>
<i>Tab.8 Vypočtené hodnoty pro žárovku 100W.....</i>	<i>45</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

THD	Total Harmonic Distortion; celkové harmonické zkreslení	-
$THD_{I,ČSN}$	Total Harmonic Distortion; celkové harmonické zkreslení definované ČSN	-
$THD_{I,IEC}$	Total Harmonic Distortion; celkové harmonické zkreslení definované IEC	-
$THDG$	Group Total Harmonic Distortion; celkové harmonické zkreslení skupiny	-
$THDS$	Subgroup Total Harmonic Distortion; celkové harmonické zkreslení podskupiny	-
$PWHD$	Partial Weighted Harmonic Distortion; částečné vážené harmonické zkreslení	-
TDC	Total Distortion Kontent; celkový obsah zkreslení	-
TDR	Total Distortion Ratio; celkové zkreslení	-
EMC	Elektromagnetická kompatibilita	-
h	Označení harmonické složky	-
$^A I_h$	Efektivní hodnota harmonické proudu fáze A řádu h	A
$^B I_h$	Efektivní hodnota harmonické proudu fáze B řádu h	A
$^C I_h$	Efektivní hodnota harmonické proudu fáze C řádu h	A
$^F I_h$	Efektivní hodnota harmonické proudu jedné fáze řádu h	A
$^A \varphi_h$	Úhel natočení složky proudu řádu h ve fázi A	°
$^B \varphi_h$	Úhel natočení složky proudu řádu h ve fázi B	°
$^C \varphi_h$	Úhel natočení složky proudu řádu h ve fázi C	°
$^F \varphi_h$	Úhel natočení složky proudu řádu h ve fázi	°
$^N I$	Efektivní hodnota proudu ve středním vodiči	A
i_N	Poměrný proud středním vodičem vztažený ku I_{ABC}	-
I_{ABC}	Průměrný proud na fázi	A
$i_{N,F}$	Poměrný proud středním vodičem vztažený ku $^F I$	-
$^N i$	Okamžitá hodnota proudu ve středním vodiči	A
$^F i$	Okamžitá hodnota proudu ve fázi	A
I	Efektivní hodnota proudu	A
ψ_t	Součinitel teplotní závislosti odporu vodiče	-
ψ_h	Součinitel reprezentující přídavné ztráty vlivem skin efektu	-
Ψ_h	Integrální forma součinitele reprezentujícího přídavné ztráty vlivem skin efektu	-

$R_{DC,Al}$	Odpor hliníkového vodiče při stejnosměrném proudu	Ω
$R_{DC,Cu}$	Odpor měděného vodiče při stejnosměrném proudu	Ω
S_{Al}	Průřez hliníkového vodiče	mm^2
S_{Cu}	Průřez měděného vodiče	mm^2
$R_{h,Al}$	Odpor hliníkového vodiče pro harmonický proud řádu h	Ω
$R_{h,Cu}$	Odpor měděného vodiče pro harmonický proud řádu h	Ω
R_g	Odpor vodiče při teplotě g	Ω
R_{20}	Odpor vodiče při teplotě 20°C	Ω
α_g	Teplotní součinitel odporu	$^\circ\text{C}^{-1}$
CRF	Cable Rating Factor; součinitel proudového zatížení	-
CRF_N	Cable Rating Factor; součinitel proudového zatížení středního vodiče	-
CRF_F	Cable Rating Factor; součinitel proudového zatížení fázového vodiče	-
CDF	Cable Derating Factor; součinitel snížení zatížení	-
CDF_K	Cable Derating Factor; součinitel snížení zatížení kabelu	-
CDF_F	Cable Derating Factor; součinitel snížení zatížení fázového vodiče	-
CDF_N	Cable Derating Factor; součinitel snížení zatížení středního vodiče	-
ΔP_{nelin}	Činné ztráty při nelineárním odběru	W
ΔP_{lin}	Činné ztráty při lineárním odběru	W
I_{nelin}	Proud nelineárního odběru	A
I_{lin}	Proud lineárního odběru	A
$^A R$	Odpor vodiče fáze A	Ω
$^B R$	Odpor vodiče fáze B	Ω
$^C R$	Odpor vodiče fáze C	Ω
$^N R$	Odpor středního vodiče	Ω
$n_{Z,S}$	Poměrné zastoupení nelineárních spotřebičů ve fázi z celkového zatížení	-
$\bar{n}_{Z,S}$	Poměrné zastoupení lineárních spotřebičů ve fázi z celkového zatížení	-
$u_{Z,S}$	Koeficient úspory činného příkonu	-
k_R	Korekce vektorového sčítání proudů odběru	-
S_F	Průřez vodiče fáze	mm^2
S_N	Průřez středního vodiče	mm^2

$I_{3.h\%}$	Poměrný proud všech harmonických přispívajících do nulové symetrické složky	-
$I_{3\%}$	Poměrný proud 3tí harmonické složky	-
$IGBT$	Insulated-Gate Bipolar Transistor; bipolární tranzistor s izolovaným hradlem	-

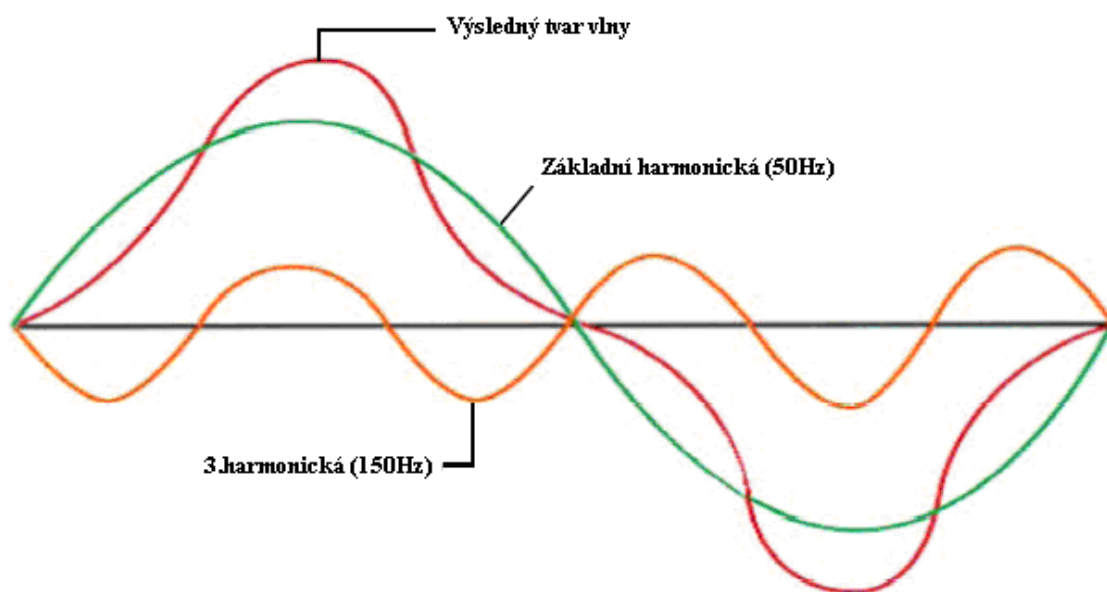
1 ÚVOD

S vývojem techniky se postupně mění i charakter a struktura spotřebitelů elektrické energie ve všech oblastech průmyslu, veřejné spotřeby i maloodběru. V dnešní době jsou změny struktury spotřeby jsou především způsobeny rozšiřováním polovodičových komponent v silnoproudých aplikacích, které se stále více uplatňují v energeticky úsporných spotřebitelských zařízeních a v elektronicky řízených spotřebičích, a v masivním nasazení zálohovaných zdrojů napájení v informačních technologiích. Tyto změny struktury spotřebičů mají vliv na kvalitu elektrické energie a ovlivňují způsob návrhu průřezu vedení v rozvodu nízkého napětí.

2 HARMONICKÉ PROUDY

2.1 Definice

Harmonickými jsou označovány proudy o frekvencích, které jsou celočíselnými násobky základní frekvence. Představují hlavní deformující složku křivek základních napětí a proudů. Na Obr. 1 je pro názornost zobrazena základní harmonická spolu s 3. harmonickou složkou proudu a výsledný nesinusový průběh.

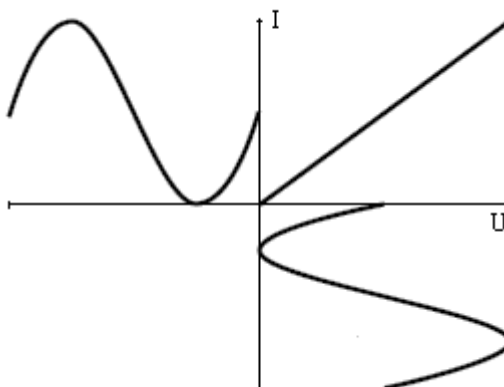


Obr. 1: Základní harmonická deformovaná 3. harmonickou složkou [7]

V praxi je většina deformovaných proudů mnohem komplikovanější, neboť obsahuje daleko větší počet harmonických. Přesto je vidět, že výsledný proud na Obr. 1 není sinusová funkce, kterou běžné měřicí přístroje, jako například RMS-multimetry, nezměří správně [7].

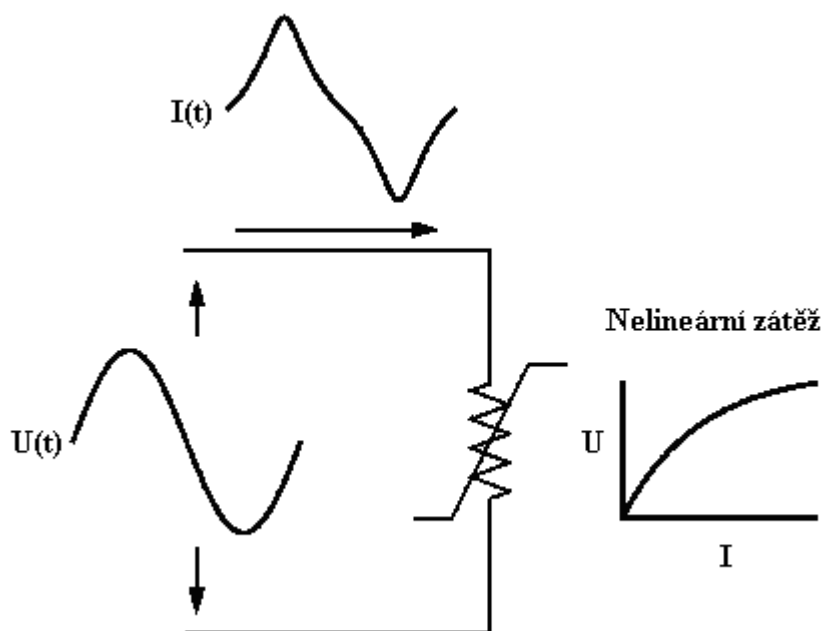
2.2 Příčiny vzniku harmonických a jejich popis

V ideální síti jsou napětí a proudy ideálně sinusových průběhů. To by však všechny typy zátěží v síti musely mít lineární průběh, který je definován voltampérovou charakteristikou na Obr. 2



Obr. 2: VA charakteristika lineárního spotřebiče [1]

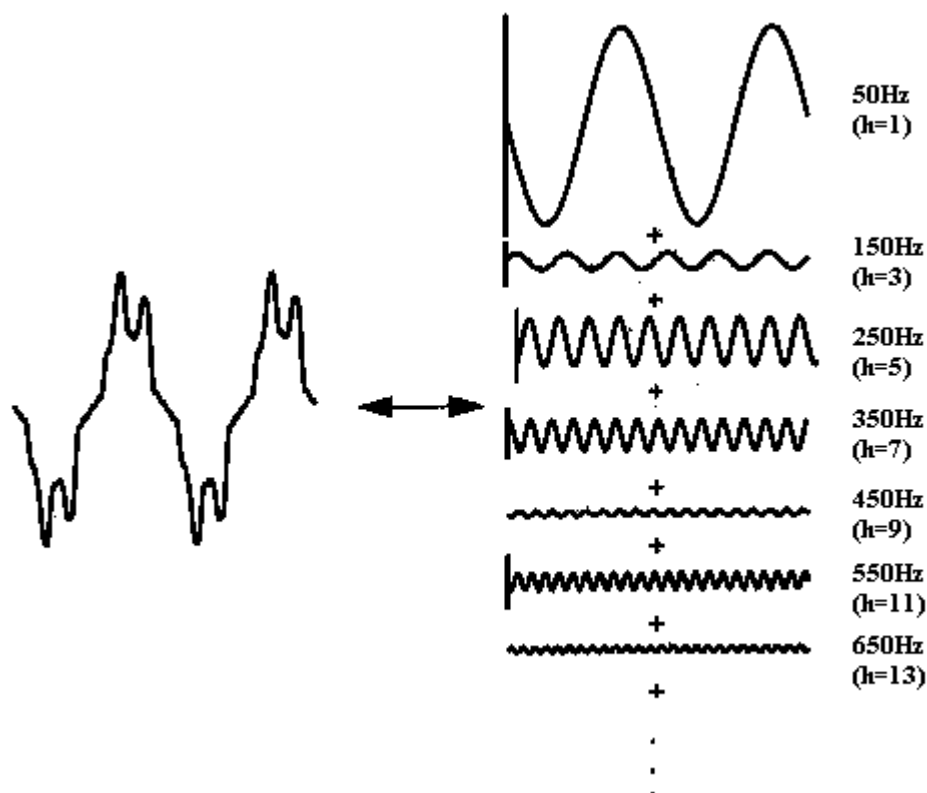
Deformace harmonického průběhu je způsobena nelineárními zátěžemi v napájecí síti, obecně se v této souvislosti hovoří o zpětném vlivu spotřebičů na síť. Nelineární zátěž je taková, kde tvar křivka proudu neodpovídá křivce napájecího napětí. Obr. 3 ukazuje jednoduchý příklad takového obvodu.



Obr. 3: Nelineární zátěž [1]

I když je v tomto případě napětí sinusové, přes nelineární rezistor protéká deformovaný proud. Takovéto zátěže jsou příčinou většiny harmonických v síti.

Obr. 4 pro názornost ukazuje, že jakýkoli periodický deformovaný děj může být vyjádřen jako množina sinusových průběhů o frekvencích, které jsou násobky základní harmonické.



Obr. 4: Skládání vln [1]

Suma těchto sinusových průběhů se pak nazývá Fourierovou řadou. Díky tomuto matematickému popisu se dá analyzovat systém odděleně po jednotlivých harmonických složkách [1].

2.3 Matematický popis – Fourierova řada

Fourierova řada obecně pro periodický děj $x(t)$

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot n \cdot t}{T}\right) + b_n \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot n \cdot t}{T}\right) \right)$$

kde koeficienty Fourierovy řady a_0, a_n, b_n vypočteme jako:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot n \cdot t}{T}\right) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot n \cdot t}{T}\right) dt$$

Matematický popis se dá dále značně zjednodušit víme-li, zda funkce, se kterou pracujeme, je sudá nebo lichá. Jedná-li se o sudou funkci, stačí vypočíst pouze koeficient a_n protože sinová funkce ve členu b_n způsobí, že je tento člen nulový. Naopak jedná-li se o lichou funkci, stačí

vypočíst pouze člen b_n . Pokud je uvažovaná funkce antiperiodická, nezbyvá než vypočíst oba parametry a_n i b_n .

Analýza Fourierovou řadou umožňuje, aby jakákoliv nesinusová, avšak periodická veličina byla rozložena do sinusových složek řady kmitočtů a na stejnosměrnou složku. Nejnižší kmitočet této řady se nazývá základní f_1 . Ostatní kmitočty v této řadě jsou celočíselnými násobky základního kmitočtu a jsou nazývány harmonické kmitočty [1].

2.4 Činitel zkreslení

Míra zkreslení harmonického průběhu se vyjadřuje pomocí činitelů zkreslení. Norma ČSN EN 61000-4-7 definuje tyto činitele zkreslení:

- **Celkové harmonické zkreslení THD**

THD (Total Harmonic Distortion) je poměr efektivní hodnoty součtu všech harmonických složek (G_n) do stanoveného řádu a efektivní hodnoty základní složky (G_1). Označení G reprezentuje efektivní hodnotu harmonické složky a podle potřeby se nahrazuje značkou I pro proudy nebo U pro napětí.

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^H \left(\frac{G_h}{G_1} \right)^2}$$

- **Celkové harmonické zkreslení skupiny THDG**

THDG (Group Total Harmonic Distortion) je poměr efektivní hodnoty skupin harmonických a efektivní hodnoty skupiny přidružené k základní složce:

$$THDG = \sqrt{\sum_{h=2}^H \left(\frac{G_{gh}}{G_{g1}} \right)^2}$$

- **Celkové harmonické zkreslení podskupiny THDS**

THDS (Subgroup Total Harmonic Distortion) je poměr efektivní hodnoty podskupin harmonických a efektivní hodnoty podskupiny přidružené k základní složce:

$$THDS = \sqrt{\sum_{h=2}^H \left(\frac{G_{sgh}}{G_{sg1}} \right)^2}$$

- **Částečné vážené harmonické zkreslení PWHD**

PWHD (Partial Weighted Harmonic Distortion) je poměr efektivní hodnoty vážené s řádem harmonické n vybrané skupiny harmonických vyššího řádu a efektivní hodnoty základní složky:

$$PWHD = \sqrt{\sum_{h=H_{\min}}^{H_{\max}} h \left(\frac{G_h}{G_1} \right)^2}$$

2.5 Definice dalších termínů

Norma ČSN EN 61000-4-7 Elektromagnetická kompatibilita (EMC) dále definuje pro zkreslení následující charakteristické veličiny:

- **Celkový obsah zkreslení TDC**

TDC (Total Distortion Content) je veličina, která se získá odečtením základní složky příslušné střídavé veličiny, kde obě jsou funkce času:

$$TDC = \sqrt{Q^2 - Q_1^2}$$

kde

Q je celková efektivní hodnota reprezentující proud nebo napětí

Q_1 je efektivní hodnota základní složky

Celkový obsah zkreslení zahrnuje jak harmonické tak mezipharmonické složky.

- **Celkové zkreslení TDR**

TDR (Total Distortion Ratio) je poměr efektivní hodnoty celkového obsahu zkreslení a efektivní hodnoty základní složky střídavé veličiny:

$$TDR = \frac{TDC}{Q_1} = \frac{\sqrt{Q^2 - Q_1^2}}{Q_1}$$

2.6 Nejčastější reálné zdroje harmonických v síti

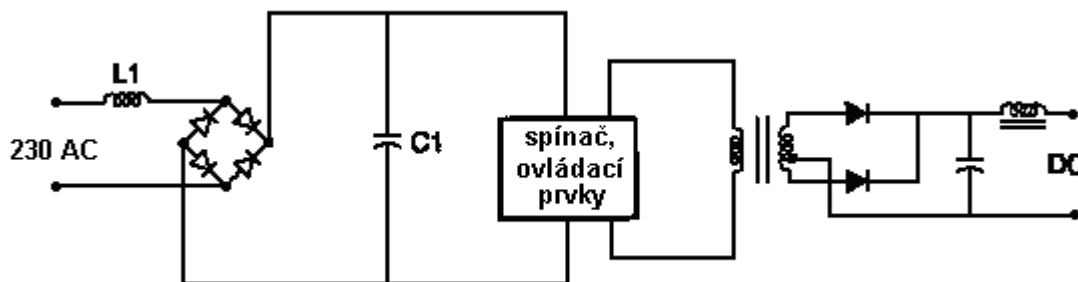
- Jednofázové zátěže:
 - spínané napájecí zdroje,
 - zářivkové osvětlení,
 - výkonové usměrňovače.
- Trojfázové zátěže:
 - motory s frekvenčními měniči,
 - výkonové měniče,
 - zdroje nepřerušovaného napájení,
 - zařízení pracující s obloukem.

2.6.1 Jednofázové zátěže

Spínané napájecí zdroje

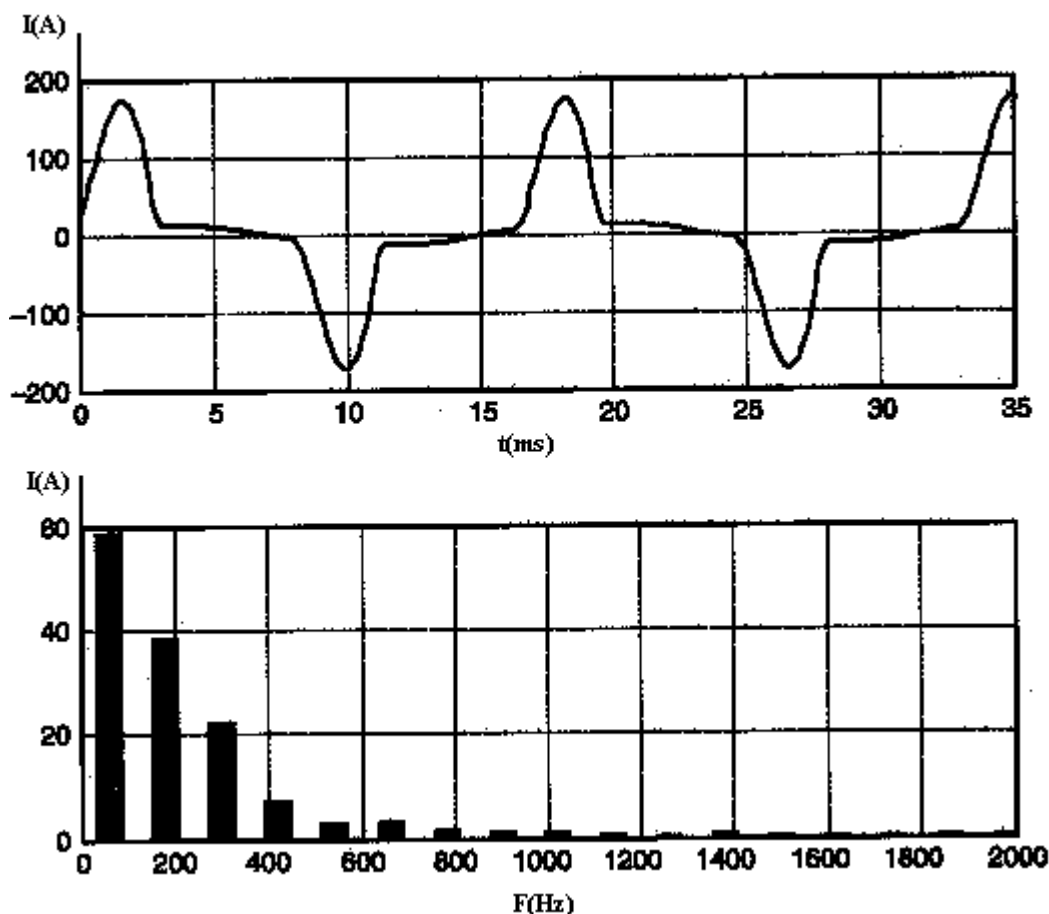
Existují dva typy spínaných zdrojů. Starší typ používá transformátor k redukci napětí na potřebnou hodnotu pro DC uzel. Induktance transformátoru má užitečný vedlejší efekt - vyhlazuje křivku proudu redukováním harmonického obsahu.

Nová technologie používá konverzi DC na DC, kde můstkový usměrňovač je připojen přímo na zdroj AC, takže v zapojení odpadá transformátor.



Obr. 5: Konverze DC na DC [1]

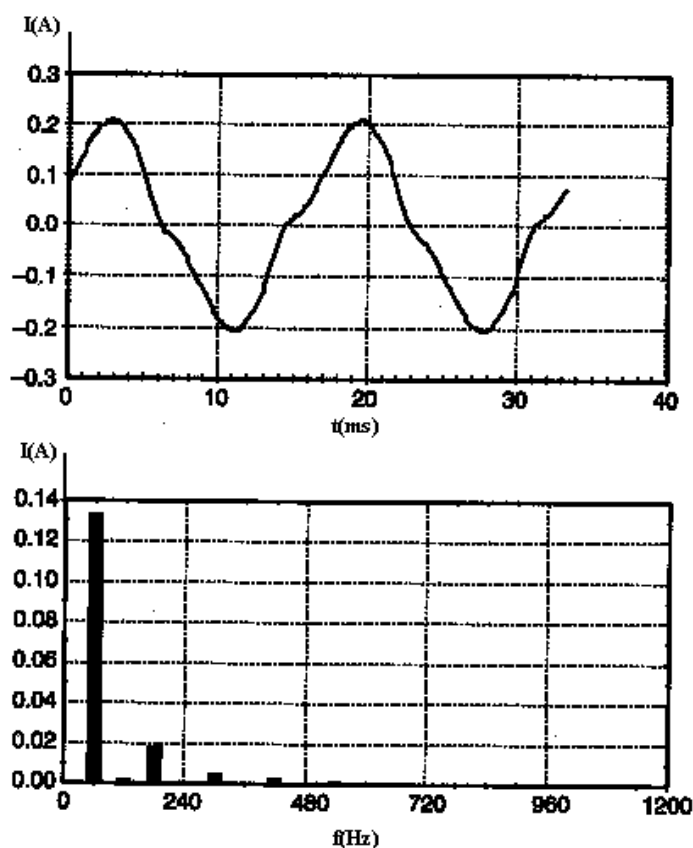
Tento druh technologie v dnešní době využívají osobní počítače, tiskárny, kopírky a většina jednofázových elektronických zařízení. Klíčovými výhodami jsou nízká hmotnost, kompaktnost, efektivnost a to, že se obvod obejde bez transformátoru. Tyto zdroje jsou většinou schopny pracovat i s velkými výchylkami vstupního napětí. Nevýhodou těchto napájecích zdrojů je vysoký obsah 3. harmonické v proudu. Na Obr. 6 je vidět příklad křivky proudu spínaného napájecího zdroje včetně harmonického spektra. Protože 3. harmonická složka se pak skládá ve středním vodiči vzniká s rostoucím počtem těchto aplikací nebezpečí přetížení středního vodiče. Zvláště pak ve starších budovách, kde pro tyto případy nebyl střední vodič dimenzován [1].



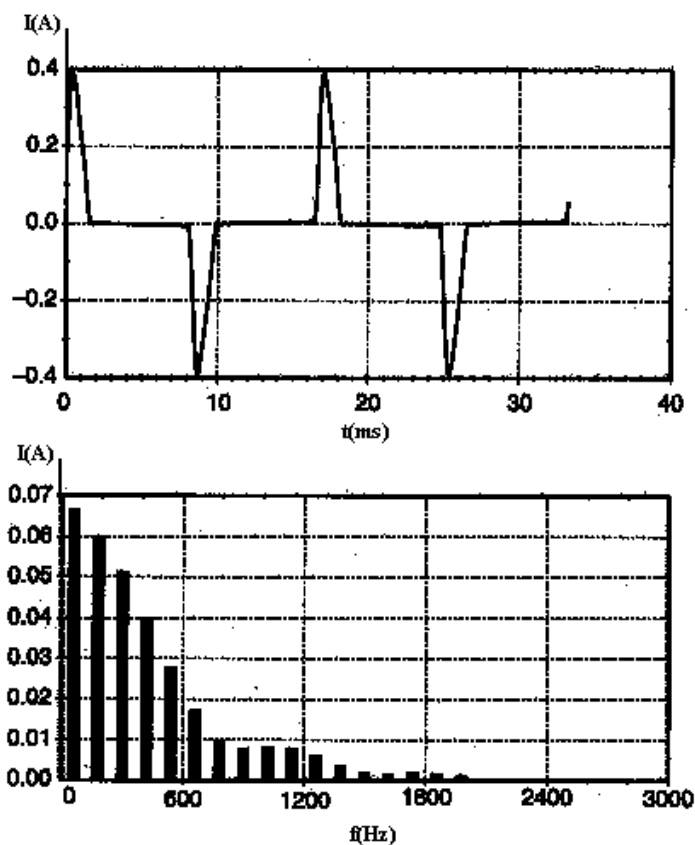
Obr. 6: Křivka proudu a spektrum spínaného napájecího zdroje [1]

Zářivkové osvětlení

Osvětlení většinou představuje 40-60% zátěže kancelářských budov a ve většině případů se používají zářivkové světelné zdroje. Zářivky jsou výbojové zdroje, které potřebují předřadník k inicializaci výboje. Existují dva typy předřadníků, magnetický a elektrický. Magnetický předřadník se skládá z transformátoru se železným jádrem s kondenzátorem uzavřeným v izolačním materiálu. Magnetický předřadník však způsobuje navýšení tepelných ztrát. Elektrický předřadník konvertuje frekvenci zdroje na vyšší, obvykle 25-40kHz. Toto má dvě základní výhody. Je třeba pouze malá tlumivka na udržení obloukového proudu a vyšší frekvence eliminuje nebo výrazně potlačí 100Hz flickr efekt, který se jako doprovodný jev vyskytuje u magnetických předřadníků. Nevýhodou elektrických předřadníků je vysoké harmonické rušení, které dosahuje hodnot THD 114%. Většina moderních předřadníků se proto vybavuje pasivními filtry, aby se harmonické zkreslení redukovalo na hodnoty THD 10-32%.



Obr. 7: Křivka proudu a spektrum zářivky s magnetickým předřadníkem [1]



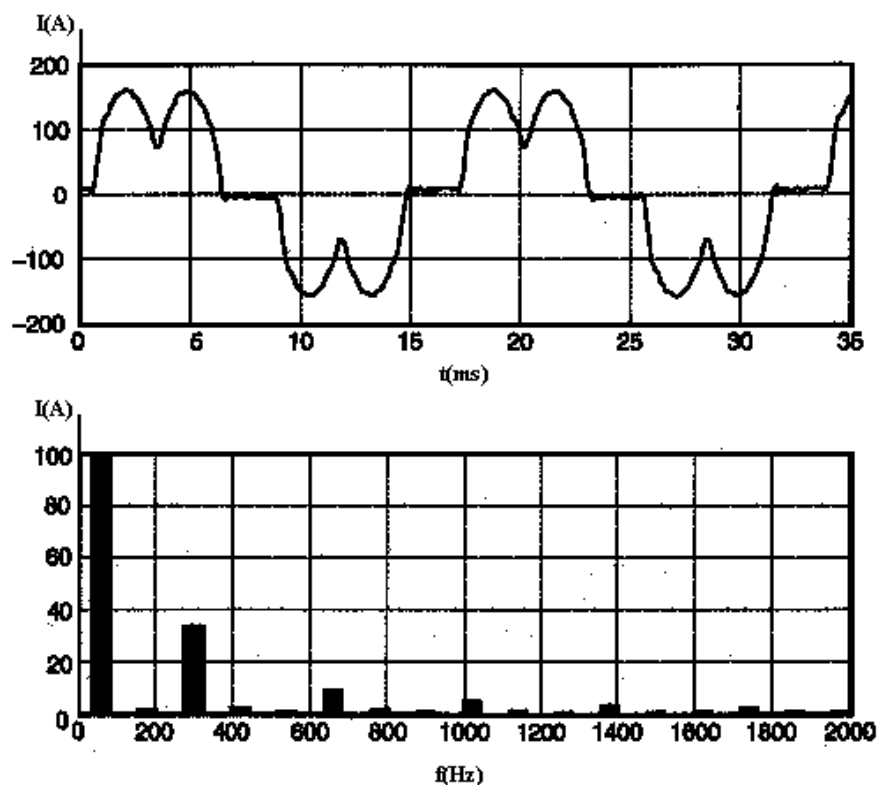
Obr. 8: Křivka proudu a spektrum zářivky s elektrickým předřadníkem [1]

Vzhledem k instalovanému výkonu osvětlovacích soustav v kancelářských komplexech a průmyslových stavbách je samozřejmým požadavkem na realizaci rovnoměrné rozdělení na všechny tři fáze [1].

2.6.2 Trojfázové zátěže

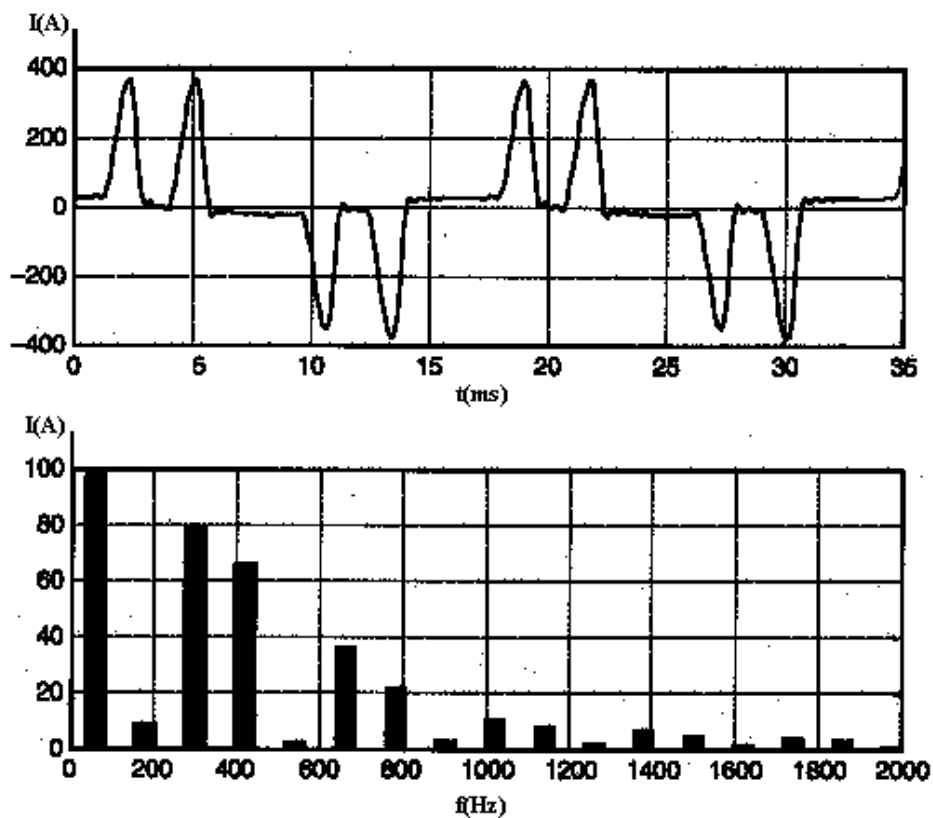
Výkonové měniče

Z hlediska zpětného vlivu na síť se trojfázové výkonové měniče od jednofázových liší tím, že negenerují 3. harmonickou složku proudu. Přesto mohou být významnými zdroji rušení jak ukazuje Obr 9.



Obr. 9: Křivka proudu a spektrum výkonového měniče [1]

Měniče s modulací šířky pulzu mají zpravidla daleko větší deformující vliv, jak je vidět na Obr 10.



Obr. 10: Křivka proudu a spektrum výkonového měniče s modulací [1]

Stejnoseměrný pohon

Výhodou stejnosměrných pohonů je relativně jednoduchý regulační systém. V porovnání se střídavými pohony nabízí širší rozsah rychlostí a vyšší rozběhový moment. Nevýhodou je pořizovací cena motoru a nutná údržba, která je dražší než u střídavých pohonů. Rostoucí technická úroveň frekvenčních měničů a cenové relace výkonové elektroniky však postupně omezují použití tohoto druhu pohonu.

Většina ze stejnosměrných pohonů využívá šestipulzních usměrňovačů. Velké pohony pak dvanáctipulzních. U šestipulzních usměrňovačů je největším problémem vysoká hodnota páté a sedmé harmonické složky. Dvanáctipulzní usměrňovače redukuje velikost těchto dvou harmonických až o 90%, ale nevýhodou je jejich cena a většinou je potřeba do obvodu zapojit ještě další transformátor [1].

Zařízení pracující s obloukem

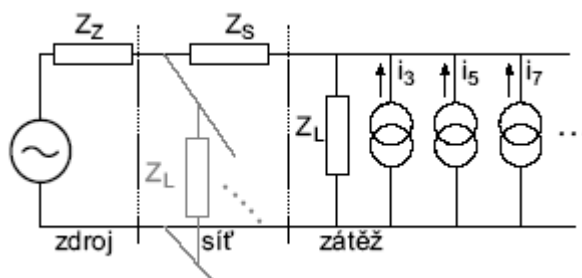
Tato kategorie představuje zařízení jako jsou obloukové pece, obloukové svářečky nebo výbojové světelné zdroje s magnetickým předřadníkem. Voltampérové charakteristiky těchto zařízení jsou nelineární. Napětí sleduje proud oblouku, když se napětí a oblouku sníží, zvýší se proud oblouku, limitován je pouze impedancí sítě. Elektrický oblouk jako takový se dá nejlépe reprezentovat jako zdroj harmonických napětí. Impedance předřadníku nebo pece však působí jako tlumič, proto je vstupní napětí jen lehce zkresleno [1].

3 ŠÍŘENÍ A KUMULACE HARMONICKÝCH

Konfigurace a topologie sítě, které zahrnují použité typy zdrojů harmonických, jejich rozmístění do obecné trojfázové napájecí sítě a vzájemné elektrické vzdálenosti, spolu se symetrií napěťové soustavy, určují celkovou úroveň harmonických a charakteristiky odběru analyzované soustavy.

Šíření harmonických proudů v napájecí síti se dá vypočítat pomocí analytických modelů, ovšem s jistým omezením, které spočívá v modelech jednotlivých prvků náhradního schématu analyzované sítě. Zejména v modelech prvků sítě, samotných spotřebičů. Problém analytických modelů je, že jsou odvozeny při určitém (např. jmenovitém) provozním stavu a při změně podmínek již výsledky neodpovídají skutečnosti. Analytické modely pro výpočet šíření vyšších kmitočtů jsou nepřesné a nevyhovující a s jejich pomocí proto nemůžeme predikovat součtové hodnoty proudů ve společném bodě.

Nelineární zátěž, která generuje harmonické, může být pro daný ustálený stav reprezentována „lineární“ zátěží paralelně s proudovými zdroji pro každou harmonickou frekvenci, jak ukazuje Obr. 11. Impedance Z_L určuje odběr na základní harmonické a je obecně tvořena RLC kombinací. Jednotlivé proudové zdroje pro harmonické proudy jsou zadány velikostí, frekvencí a fázovým posuvem. Generované harmonické proudy se šíří od svého zdroje směrem do napájecí sítě a přitom „vidí“ její výslednou impedanci. Rozložení harmonických proudů na jednotlivé větve sítě se řídí Ohmovým zákonem a výpočet obvodu pro každou frekvenci může být proveden s použitím Theveninovy věty a principu superpozice.



Obr. 11: Ekvivalentní obvod pro nelineární zátěž [4]

Jednotlivé harmonické proudy zátěží lze tedy počítat samostatně jako komplexní veličiny. Vektorový součet proudů všech spotřebičů v dané fázi potom určuje celkové zatížení nebo příspěvek k zatížení napájecího systému.

Jak postupujeme napájecím systémem, měli bychom připočítat i odběr ostatních spotřebičů zapojených v daném uzlu, protože i ty se budou podílet na souhrnném účinku. Přitom lze obecně říci, že:

- harmonické nižších řádů lze s poměrně dostatečnou přesností sumarizovat, a to buď skalárně, nebo přesněji a v závislosti na skladbě spotřebičů, vektorově
- harmonické vyšších řádů, se v napájecí síti šíří způsobem, který nelze předikovat, a proto je jejich sumarizace velice obtížná
- popřípadě můžeme uvažovat i soudobost provozu a další specifika

Pro zjednodušení předpokládejme, že zdroje s deformovaným odběrem proudu jsou co do elektrických vlastností stejné a tvoří symetrickou zátěž v symetrické napájecí soustavě.

$${}^A I_h = {}^B I_h = {}^C I_h = {}^F I_h, \quad {}^A \varphi_h = {}^B \varphi_h = {}^C \varphi_h = {}^F \varphi_h \quad \text{pro všechna } h$$

Jestliže nyní sestojíme fázorový diagram proudů odebíraných na základní harmonické, dostaneme proudovou soustavu, která se vyznačuje fázovou i modulovou symetrií. Provedením rozkladu na souměrné složky tedy dostáváme pouze souslednou soustavu. Harmonické složky odebíraného proudu v jednotlivých fázích mohou být rovněž reprezentovány fázory v kruhovém diagramu. A za stejných předpokladů je na Obr. 12 uveden případ pro 1., 3. a 5. harmonickou odebíraného proudu v třífázové soustavě. Obecně pro n -tou harmonickou platí:

$${}^B I_h = {}^A I_h \cdot e^{-j \cdot h \cdot 120^\circ}, \quad {}^C I_h = {}^A I_h \cdot e^{-j \cdot h \cdot 240^\circ}$$

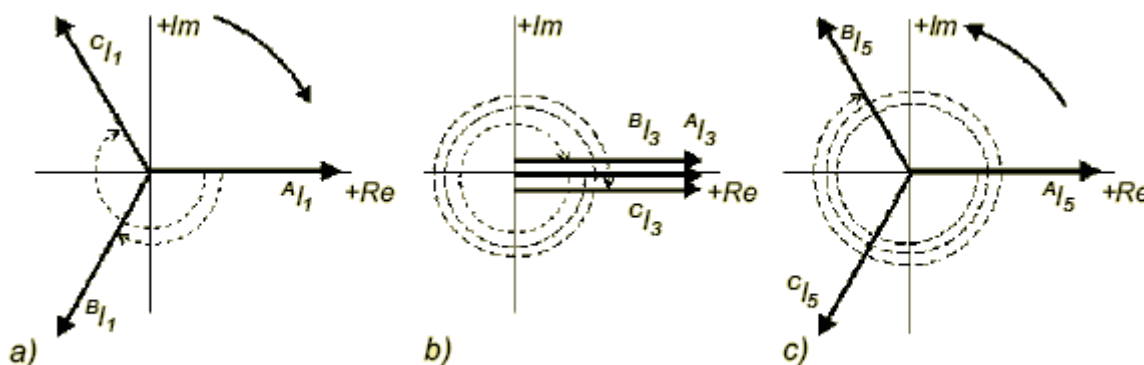
Potom při souměrném zatížení budou všechny fázové symetrické harmonické složky odebíraného fázového proudu rotační, s příspěvkem do sousledné či zpětné složky proudu a všechny fázové asymetrické harmonické složky proudu budou vytvářet statickou soustavu s příspěvkem do nulové složky proudu. Platí tedy:

- sousledná harmonická složka $h = 3 \cdot n + 1$ kde $n = 1, 2, 3, \dots$
- zpětná harmonická složka $h = 3 \cdot n - 1$
- nulová harmonická složka $h = 3 \cdot n$

Pro proud ve středním vodiči to znamená, že:

- základní harmonické a všechny harmonické řádu $h=3.n \pm 1$ jednotlivých fází se ve středním vodiči vyruší
- případné stejnosměrné složky a harmonické řádu $h=3.n$ jednotlivých fází se ve středním vodiči skalárně sečtou

Jestliže ovšem jeden či více z předcházejících předpokladů nebude splněn, potom se ze symetrických složek stanou asymetrické, atd. Jinak to tedy znamená, že nebudou-li celkové fázové proudy odebírané soustavou stejné, potom v krajním případě bude každá z harmonických třífázových soustav vytvářet souslednou, zpětnou i nulovou soustavu s příspěvkem do příslušné složky [4].



Obr. 12: Fázorové diagramy a) první b) třetí c) páté harmonické složky proudu při třífázovém symetrickém odběru a jejich projev v souměrných soustavách [4]

4 ZATÍŽENÍ STŘEDNÍHO VODIČE

Z předchozí kapitoly vyplývá, že proudy 3. harmonické se přidávají k nulovým složkám a ve středním vodiči potom proud odpovídá až tří násobku proudu třetí harmonické ve fázi. Obecně, pro souměrný a vyvážený odběr spotřebičů stejného typu ve všech fázích, lze napsat:

$$^N I = 3 \cdot \sqrt{\sum_h^n {}^F I_h^2} \quad \text{kde } h = 3, 9, 15, 21, 27, 33 \dots$$

Veličina ${}^F I_h$ je efektivní hodnota harmonické proudu jedné fáze řádu h .

Tento fakt má přímý dopad na velikost zatížení středního vodiče. Názorně je celý problém zobrazen v časové oblasti na Obr.13. Vyjádření proudu středním vodičem efektivní (absolutní) hodnotou je nepraktické, a proto proud středním vodičem vztáhneme pro lepší reprodukovatelnost k průměrnému proudu na fázi, s označením I_{ABC} a zavedeme tak poměrný proud středním vodičem i_N :

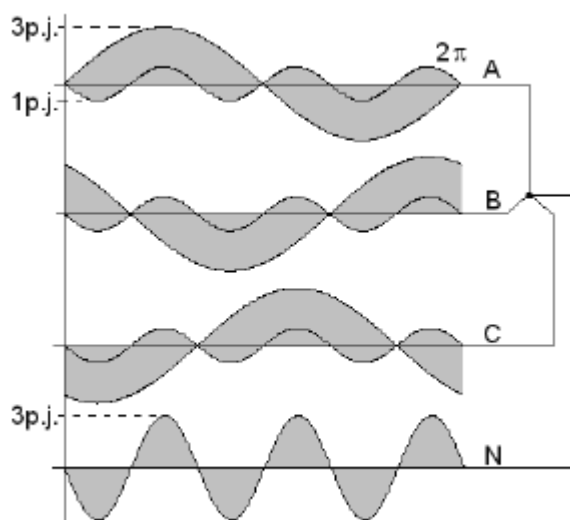
$$i_N = \frac{{}^N I}{I_{ABC}}$$

kde I_{ABC} vypočteme:

$$I_{ABC} = \frac{1}{3}({}^A I + {}^B I + {}^C I)$$

Proud středním vodičem může být také vztažen k efektivní hodnotě proudu ve fázi ${}^F I$, který je při souměrném a vyváženém zatížení shodný s I_{ABC} :

$$i_{N,F} = \frac{{}^N I}{{}^F I}$$



Obr. 13: Příklad sčítání 1. a 3. harmonické proudu ve středním vodiči při souměrném odběru v souměrné síti [4]

Pokud je jednofázová zátěž s lineárním charakterem odběru, která odebírá sinusový proud, zapojena symetricky do třífázové, čtyřvodičové nebo pětivodičové symetrické sítě, bude proud středním vodičem roven nule ${}^N I = 0$ a jeho poměrná hodnota rovněž $i_N = i_{N,F} = 0$. První mezní velikost proudu středním vodičem je tedy určena podmínkami:

- síť je zatížena lineárními spotřebiči, přesněji spotřebiči se sinusovým průběhem odebíraného proudu,
- zátěž je do třífázové sítě rozložena rovnoměrně, s amplitudovou i fázovou symetrií.

Další mezní velikost vyplývá z úplné nesymetrie odběru, kdy je v třífázovém systému zatížena pouze jedna fáze. Průběh okamžité hodnoty proudu ve středním vodiči je tedy roven proudu zatíženou fází ${}^N i = {}^F i$ a pro velikosti proudů zapsané pomocí harmonických složek platí:

$${}^F I = \sqrt{\sum_{h=1}^n {}^F I_h^2} = \sqrt{\sum_{h=1}^n {}^N I_h^2} = {}^N I$$

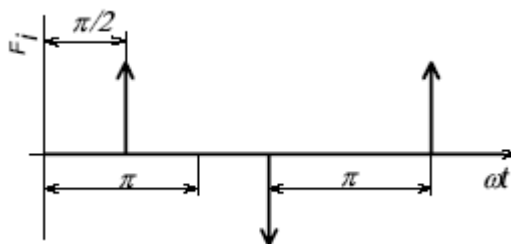
To znamená, že poměrná velikost proudu středním vodičem je pro tento případ $i_{N,F} = 1$ a je nezávislá na míře deformace fázového proudu. Její velikost je stejná $i_{N,F} = 1$ pro minimální deformaci (sinusový průběh) i maximální deformaci fázového proudu.

Posledním bodem, který ohraničuje prostor závislosti poměrné velikosti proudu středním vodičem na symetrii odběru a deformaci odebíraných proudů, je při odběru proudů s maximální deformací a s naprosto stejným průběhem okamžité hodnoty (včetně velikosti) ve všech třech fázích. Této symetrie odběru lze dosáhnout použitím stejných rovnoměrně rozložených spotřebičů. Pro $i_{N,F}$ při symetrickém odběru stejnými spotřebiči v trojfázové napěťové symetrické napájecí soustavě lze napsat:

$$i_{N,F} = \frac{N}{F} \frac{I}{I} = \frac{3 \cdot \sqrt{\sum_{t=3,h}^n {}^F I_t^2}}{\sqrt{\sum_{h=1}^n {}^F I_t^2}} = i_N = \frac{N}{I_{ABC}} \frac{I}{I} = \frac{3 \cdot \sqrt{\sum_{t=3,h}^n {}^F I_t^2}}{\frac{3}{\sqrt{3}} \sqrt{\sum_{h=1}^n {}^F I_t^2}}$$

$$i_{N,F} = \frac{3 \cdot \sqrt{{}^F I_3^2 + {}^F I_9^2 + {}^F I_{15}^2 + {}^F I_{21}^2 + \dots}}{\sqrt{{}^F I_1^2 + {}^F I_3^2 + {}^F I_5^2 + {}^F I_7^2 + {}^F I_9^2 + {}^F I_{11}^2 + {}^F I_{13}^2 + \dots}}$$

Maximální deformace odebíraného proudu znamená, že celkové harmonické zkreslení je $THD_{I,\check{C}SN} = \infty$ nebo $THD_{I,IEC} = 100\%$. Platí, že THD se zvětšuje se zkracováním doby průchodu proudu v půlperiodě. Definice maximální deformace periodického průběhu tedy vede na jednotkový Diracův impuls.



Obr. 14: Diracův impuls [4]

Spektrum periodicky opakujícího se Diracova impulsu podle Obr. 14 má nekonečný počet složek stejných velikostí na všech lichých násobcích základní frekvence. Dosazením spektra efektivních hodnot harmonických Diracova impulsu do rovnice a jejím řešením, je možno analyticky vypočítat velikost poměrného proudu středním vodičem za daných podmínek:

$$i_{N,F} = \lim_{h \rightarrow \infty} \frac{3 \cdot \sqrt{\sum_{t=3,h}^n {}^F I_t^2}}{\sqrt{\sum_{h=1}^n {}^F I_h^2}} = \lim_{h \rightarrow \infty} \frac{3 \cdot \sqrt{\frac{h}{3} \cdot {}^F I_h^2}}{\sqrt{h \cdot {}^F I_h^2}} = \sqrt{3} = \max[i_{N,F}]$$

Ve jmenovateli i čitateli je nekonečné množství harmonických stejných velikostí. Sumy lze proto nahradit součinem a dále z nekonečného rozvoje vyplývá, že harmonických složek v proudu středním vodičem je právě 3krát méně než ve fázovém. Vypočtená hodnota je poslední hledaná mezní velikost poměrného proudu středním vodičem a zároveň maximální. To znamená, že proud středním vodičem bude, při souměrném zatížení spotřebiči se stejným průběhem proudů se zkreslením $THD_{I,IEC} = 100\%$, $\sqrt{3}$ -krát větší než proud ve fázi.

V souhrnu, velikost $i_{N,F}$ nabývá, v závislosti na deformaci odebíraných proudů (obsahu soufázových harmonických), tedy na typu zátěže a na jejím rozložení do třífázové napájecí sítě, hodnot v rozsahu $\langle 0, \sqrt{3} \rangle$ [4].

5 CELKOVÉ ZATÍŽENÍ NAPÁJECÍHO VEDENÍ

Dovolené zatížení kabelových vedení je obvykle stanoveno na základě jejich dovoleného tepelného namáhání, které je způsobeno procházejícím proudem. Přičemž předpokladem je, že proud prochází pouze odpovídajícím počtem vodičů. Pokud bude kabel zatížen nelineárními spotřebiči shodných elektrických vlastností generující harmonické, které tvoří symetrickou zátěž v symetrické napájecí soustavě, bude proud středním vodičem nenulový a jeho velikost je dána velikostí soufázových složek harmonických fázového proudu, které se ve středním vodiči ze všech tří fází sčítají. Jinými slovy, jestliže i středním vodičem protéká proud, pak jsou v kabelu zdrojem tepla více než například tři vodiče a je třeba snížit jejich dovolené zatížení (Jouleovy ztráty), do kterého je třeba zahrnout i vliv skin efektu. Zároveň však nesmí docházet k lokálnímu přetěžování středního vodiče. Celý postup určení zatížení a následného snížení zatížení je pro specifický odběr uveden v následujícím.

Efektivní hodnota neharmonického periodického odebíraného fázového proudu lze rozepsat:

$$I = \sqrt{\sum_{h=1}^n I_h^2} = \sqrt{I_1^2 + \sum_{h=2}^n I_h^2}$$

Velikost přenášeného výkonu (resp. proudu) vodičem je limitována ztrátami na jeho činném odporu a poměrné zvýšení ztrát vlivem procházejících harmonických může být definováno vztahem:

$$\sum_{h=1}^n \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 = 1 + THD_{I,CSN}^2$$

Přitom musíme počítat i s přídatnými ztrátami, které vznikají vlivem skin efektu, kdy činný odpor vodiče roste s frekvencí procházejícího proudu a vlivem teplotní závislosti odporu vodiče ψ_t . Přídatné ztráty vlivem skin efektu reprezentuje součinitel ψ_h , který může být pro konkrétní spektrum vyjádřen i v integrální formě Ψ_h . Zahrnutím součinitelů přejde předchozí rovnice na tvar:

$$\sum_{h=1}^n \psi_h \cdot \psi_t \cdot \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 = \Psi_h \cdot \psi_t \cdot (1 + THD_{I,CSN}^2)$$

Zvýšení odporu vlivem skin efektu se obvykle určuje experimentálně a je závislé na konstrukci vodiče, jeho materiálu a průřezu a na frekvenci průchozího proudu. Skin efekt se v oboru frekvencí do 2kHz (5kHz) uplatňuje především pro větší průřezy.

Výsledné tvary rovnic pro hliníkový a měděný vodič s plným průřezem, které respektují i průřez vodiče jsou:

$$R_{h,Al} = R_{DC,Al} \cdot (1 + 0,26 \cdot S_{Al}^2 \cdot h^2 \cdot 10^{-6}) \quad \psi_{h,Al} = \frac{R_{h,Al}}{R_{DC,Al}} = (1 + 0,26 \cdot S_{Al}^2 \cdot h^2 \cdot 10^{-6})$$

$$R_{h,Cu} = R_{DC,Cu} \cdot (1 + 0,10125 \cdot S_{Cu}^2 \cdot h^2 \cdot 10^{-6}) \quad \psi_{h,Cu} = \frac{R_{h,Cu}}{R_{DC,Cu}} = (1 + 0,10125 \cdot S_{Cu}^2 \cdot h^2 \cdot 10^{-6})$$

kde $R_{DC,Al}$; $R_{DC,Cu}$ je odpor hliníkového popřípadě měděného vodiče při stejnosměrném proudu a S_{Al} a S_{Cu} jsou průřezy hliníkového resp. měděného vodiče (mm^2).

Zvýšení odporu vlivem změny teploty lze vypočítat z rovnice:

$$\psi_t = \frac{R_g}{R_{20}} = 1 + \alpha_g (g - 20)$$

kde R_g a R_{20} jsou odpory vodiče při teplotách g a $20^\circ C$ a α_g je teplotní součinitel odporu – měď $\alpha_g = 4,17 \cdot 10^{-3} ^\circ C^{-1}$, hliník $\alpha_g = 3,87 \cdot 10^{-3} ^\circ C^{-1}$.

Z rovnosti ztrát na vodiči, kterým v jednom případě prochází jmenovitý sinusový proud a v druhém případě proud s obsahem harmonických, můžeme stanovit součinitel jeho proudového zatížení způsobující tepelné namáhání – Cable Rating Factor (CRF) (bez uvažování vlivu skin efektu a tepelné závislosti odporu):

$$\Delta P_{nelin} = \Delta P_{lin}; \quad I_{nelin}^2 = (CRF \cdot I_{lin})^2 \Rightarrow CRF = \frac{I_{nelin}}{I_{lin}}$$

Mezní případ nastane, bude-li při zatížení sítě nelineárním odběrem protékat středním vodičem maximální velikost proudu. V tom případě je velikost proudů ve všech fázích stejná a za předpokladu stejného odporu všech vodičů (fázových i středního) můžeme napsat:

$$\Delta P_{nelin} = {}^A R \cdot {}^A I^2 + {}^B R \cdot {}^B I^2 + {}^C R \cdot {}^C I^2 + {}^N R \cdot (\sqrt{3} {}^A I)^2 = 6 \cdot {}^A R \cdot {}^A I^2$$

Naopak s lineární symetrickou zátěží budou ztráty:

$$\Delta P_{lin} = {}^A R \cdot {}^A I^2 + {}^B R \cdot {}^B I^2 + {}^C R \cdot {}^C I^2 = 3 \cdot {}^A R \cdot {}^A I^2$$

To znamená, že navýšení ztrát, které způsobují tepelné namáhání kabelů je až dvojnásobné.

Abychom mohli vyjádřit úroveň zatížení jednotlivých vodičů a kabelu jako celku (CRF) v závislosti na skladbě odběru, budeme postupně nahrazovat původní činnou zátěž, která odebírala sinusový proud, nelineární zátěží s impulsním charakterem odběru. Z hlediska definice zatížení kabelu bude náhrada probíhat při stejné efektivní hodnotě odebíraného proudu. Dalšími podmínkami jsou: souměrné zatížení a souměrná náhrada v souměrné nedeformované napájecí soustavě. Definujeme tedy koeficient náhrady $n_{Z,S}$, který vyjadřuje poměrné zastoupení nelineárních spotřebičů ve fázi z celkového zatížení, přičemž ostatní odběr je lineární a je vyjádřen doplňkem:

$$\bar{n}_{Z,S} = 1 - n_{Z,S}$$

Dále se s nahrazeným proudem změní i velikost činné složky, což definujeme jako koeficient $u_{Z,S}$ (můžeme ho nazvat i úsporou činného příkonu). Po úpravě pro CRF z hlediska zatížení fázového vodiče získáme následující vztah:

$$CRF_F = \sqrt{(\bar{n}_{Z,S} + n_{Z,S} \cdot u_{Z,S})^2 + (\bar{n}_{Z,S} \cdot u_{Z,S} \cdot THD_{I,\dot{C}SN})^2} \cdot k_R$$

Výsledek by měl být v oboru závislosti $n_{Z,S} = \langle 0,1 \rangle$ roven jedné. Ovšem vzhledem k vektorovému sčítání proudů odběru oproti skalárně počítané náhradě musí být velikost proudu odebíraného lineární částí i nelineární částí zátěže korigována právě koeficientem k_R dle vztahu:

$$k_R = \frac{\bar{n}_{Z,S} + n_{Z,S} \cdot u_{Z,S} \cdot \sqrt{1 + THD_{I,\dot{C}SN}^2}}{\sqrt{(\bar{n}_{Z,S} + n_{Z,S} \cdot u_{Z,S})^2 + (n_{Z,S} \cdot u_{Z,S} \cdot THD_{I,\dot{C}SN})^2}}$$

Dále platí, že pro obor $n_{Z,S} = (1, \infty)$ je $\bar{n}_{Z,S} = 0$ a $k_R = 1$.

Oproti původnímu odběru bude zatěžován i střední vodič napájecího kabelu, ve kterém se sčítají soufázové harmonické jednotlivých fází. Velikost proudu středním vodičem je vzhledem k jeho průřezu vhodné vztáhnout k proudu fází. Poměrné proudové zatížení středního vodiče v závislosti na stupni náhrady a vztahené k proudu fází při původním odběru (bez náhrady), tedy CRF z hlediska zatížení středního vodiče je:

$$CRF_N = n_{Z,S} \cdot u_{Z,S} \cdot \sqrt{1 + THD_{I,\dot{C}SN}^2} \cdot i_{N,F} \cdot \left(\frac{S_F}{S_N} \right)^{0,64} \cdot k_R$$

Vztah respektuje i rozdílné průřezy fázových S_F a středního vodiče S_N , přičemž změna dovoleného proudového zatížení není se změnou průřezu lineární a pro kruhový průřez můžeme tuto závislost vyjádřit mocninnou funkcí:

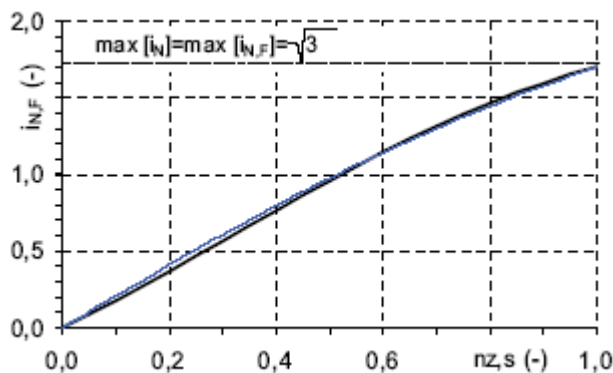
$$\frac{In_{S1}}{In_{S2}} = \left(\frac{S_1}{S_2} \right)^p; \quad p = 0,64$$

Mocnitel p byl stanoven na základě aproximace katalogových hodnot.

Průběh poměrné velikosti proudu středním vodičem při definované kombinaci lineární a nelineární zátěže v závislosti na $n_{Z,S}$ je na *Obr. 15*. Lze použít aproximaci funkcí:

$$i_{N,F} = 3 \cdot \sqrt{\frac{0,47 \cdot n_{Z,S}^2}{1 + 0,47 \cdot n_{Z,S}^2}}$$

která je na *Obr. 15* vynesena modrou čarou.



Obr. 15: Poměrná hodnota velikosti proudu středním vodičem při definované kombinaci lineární a nelineární zátěže v závislosti na $n_{Z,S}$ [4]

CRF z hlediska celkového zatížení třífázového 4vodičového kabelu je zcela analogicky s předchozím:

$$CRF_K = (n_{Z,S} \cdot u_{Z,S}) \cdot \sqrt{\left(\frac{\bar{n}_{Z,S}}{n_{Z,S} \cdot u_{Z,S}} + 1\right)^2 + \Psi_I \cdot THD_{I,\check{C}SN}^2 + \frac{1}{3} \cdot \Psi_{IN} \cdot (1 + THD_{I,\check{C}SN}^2) \cdot i_N^2 \cdot \frac{S_F}{S_N} \cdot k_R}$$

Dále stanovíme na kolik musíme snížit zatížení kabelu tak, aby byly ztráty rovny ztrátám při procházejícím jmenovitým sinusovém proudu. Toto snižování zatížení je nazýváno Cable Derating Factor (CDF). Jednotlivé potřebné snížení zatížení z hlediska dovoleného zatížení fázového vodiče CDF_F , středního vodiče CDF_N a kabelu jako celku CDF_K je:

$$CDF_x = \frac{1}{CRF_x} \text{ pro } CRF_x > 1 \text{ jinak } CDF_x = 1, \text{ kde } x \text{ je } F, N \text{ nebo } K$$

Je zřejmé, že vlivem zatížení nesmí dojít k překročení dovoleného tepelného namáhání celého kabelu, ale ani jeho částí (fázových a středního vodiče). Výsledný CDF je tedy minimální funkcí všech omezení:

$$CDF = \min[CDF_F; CDF_N; CDF_K]$$

Výsledky odvozené pro jednofázový a třífázový kabel můžeme použít i pro i jinou kombinaci uspořádání vodičů, než v kabelu. Např. pro samostatné vodiče, které jsou od sebe navzájem tak vzdáleny, že jejich tepelnou interakci můžeme zanedbat. Této podmínce vyhovují některé přípojnícové systémy, nebo neizolovaná venkovní vedení. Potom kritériem pro omezení zatížení u jednofázového systému je opět pouze CDF_F a u třífázových systémů CDF_F a CDF_N [4].

6 DŮSLEDKY HARMONICKÝCH PROUDŮ

Harmonické proudy produkované nelineárními zátěžemi jsou injektovány zpět do elektrizační soustavy. Mohou pak přímo i nepřímo nepříznivě působit na celou řadu prvků v této soustavě jako jsou kondenzátorové baterie, transformátory, motory - způsobují přídavné ztráty, přehřívání a přetěžování. Také mohou interferovat s telekomunikačními linkami a ovlivňovat měření v soustavě.

6.1 Primární důsledky harmonických proudů

Prvky elektrizační soustavy jsou ovlivněny přímo harmonickým proudem.

6.1.1 Transformátory

Transformátory jsou navrženy tak, aby dodaly výkon k připojeným zátěžím s minimálními ztrátami a se základní frekvencí. Harmonické rušení proudu zde významně přispívá k přídavným tepelným ztrátám.

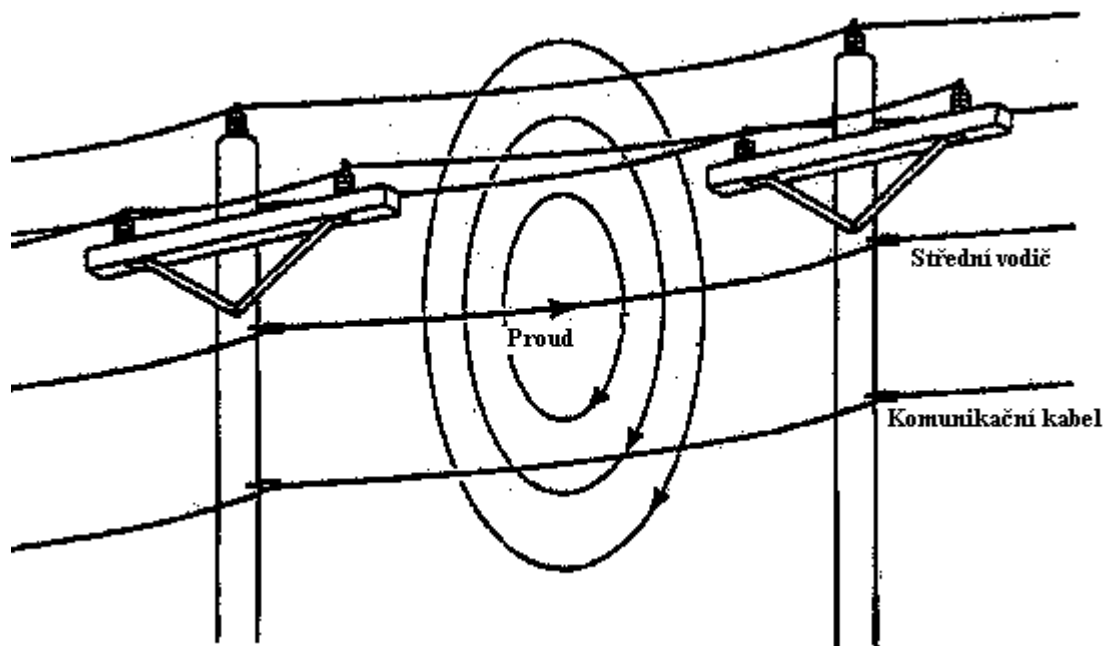
Pokud je transformátor navržen pouze pro výkonové požadavky zátěže, mohou harmonické proudy způsobit, že efektivní hodnota proudu bude vyšší než jmenovitá hodnota transformátoru.

Indukované proudy uvnitř transformátoru způsobené magnetickým tokem, tečou do vinutí, do jádra a dalších částí a také způsobují přídavné ztráty. Tyto ztráty rostou s druhou mocninou frekvence proudu, který vířivé proudy způsobuje.

Poslední přírůstek ztrát mohou ovlivňovat ztráty v železe. Ty budou závislé na dopadu harmonického rušení na přiložené napětí a na konstrukci jádra transformátoru. Podíl přírůstku ztrát v železe není nějak markantní [1].

6.1.2 Telekomunikace

Harmonické proudy ve veřejné distribuční síti mohou interferovat s komunikačními linkami. Problémem jsou především sítě s vysokým obsahem harmonických ve středním vodiči, které se spojují v telekomunikačních obvodech indukční vazbou.



Obr. 16: Induktivní vazba mezi středním vodičem a telekomunikační linkou [1]

Tento jev byl velkým problémem pro telefonní venkovní vedení, kde nebylo stínění. Dnes se využívají stíněné stočené vodiče, na jejichž funkci nemá indukční vazba takový vliv [1].

6.1.3 Přetížení středního vodiče

V trojfázové síti jsou fázová napětí vzájemně posunuta o 120° , a tedy pokud jsou všechny fáze stejně zatíženy, je výsledný proud ve středním vodiči nulový. Jestliže je zatížení nevyvážené, pak ve středním vodiči protéká proud, který je výsledkem vektorového součtu fázových proudů.

Při přetížení a následném přerušení středního vodiče, vlivem harmonických, dojde k tomu, že fázové napětí je distribuováno v poměru impedancí spotřebičů připojených na jednotlivé fáze a může dosahovat až sdružených hodnot. To má za důsledek zničení většiny spotřebičů připojených na postižené vedení.

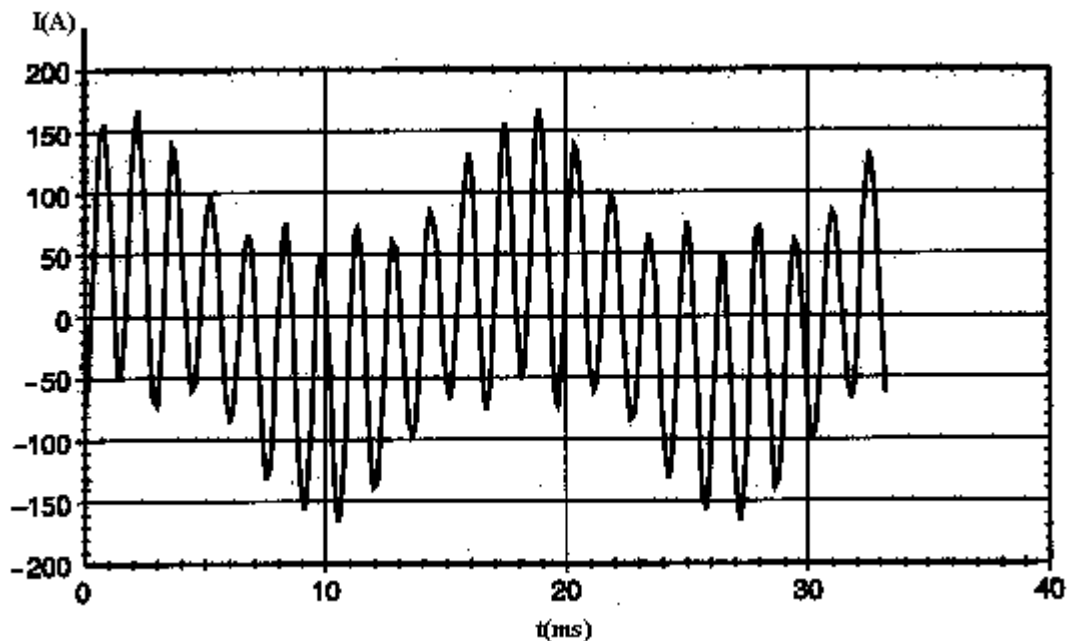
6.2 Sekundární důsledky harmonických proudů

Harmonický proud zátěže způsobuje napětové zkreslení na impedanci napájecí sítě. Výsledné zkreslené napětí je využíváno pro všechny ostatní připojené zátěže a způsobuje průtok neharmonického proudu, a to i v případě lineárních zátěží.

6.2.1 Kondenzátorové baterie

Impedance kondenzátoru je nepřímo úměrná frekvenci. Proto kondenzátor vykazuje pro vyšší harmonické proudy velmi malou impedanci. Důsledky harmonických proudů na kondenzátorové baterie jsou pak: zvýšený proud kondenzátoru, vyšší ztráty, vyšší provozní teplota, která může vést k poškození nebo i zničení kondenzátorové baterie. Může docházet také k rezonancím mezi kondenzátorem a sítí. V kondenzátorové baterii dochází během rezonance k deformaci napětí. Proud protékající do kondenzátorové baterie obsahuje velký počet

harmonických složek. Obr. 17. ukazuje stav rezonance společně s průběhem nežádoucí 11. harmonické složky [1].



Obr. 17: Proud kondenzátoru s rezonancí 11. harmonickou

Takovýto typický průběh proudu indikuje, že systém je v rezonanci. V takovýchto podmínkách je pak efektivní hodnota proudu vyšší než je jmenovitý proud kondenzátorové baterie.

6.2.2 Motory

Na motory může mít významný dopad především harmonické zkreslení napětí. Toto zkreslené napětí přivedené na svorky motoru se pak dále přemění na harmonické toky uvnitř motoru. Harmonické toky nepřispívají nijak významně k momentu motoru, vytváří totiž točivé magnetické pole, avšak jiné než jmenovitá frekvence motoru. Toto pak způsobuje především zvýšení ztrát v železe. Důsledkem je přímé snížení účinnosti a díky přehřívání i možným vibracím také snížení dlouhodobé životnosti motoru [1].

6.2.3 Poruchy při průchodu nulou

Mnohé elektronické regulátory určují bod, kdy napájecí napětí prochází nulou, aby stanovily okamžik vypnutí zátěže. Je to dáno tím, že vypínání induktivní zátěže při průchodu nulou nezpůsobuje přechodové jevy a tím se redukuje elektromagnetické interference a namáhání polovodičových spínacích zařízení. Jsou-li v napájecím napětí harmonické, nebo přechodové jevy, pak jsou změny napětí při průchodu nulou rychlejší a hůře identifikovatelné, což vede k nepravidlostem v provozu regulátorů. Může zde být dokonce i několik průchodů nulou během jedné půlperiody [1].

7 TEPELNÉ NAMÁHÁNÍ VODIČŮ

V praktické části této práce bylo úkolem získat závislosti velikosti poměrného proudu ve středním vodiči $i_{N,F}$ na $THD_{I,\check{C}SN}$, $I_{3,h\%}$, $I_{3\%}$ a závislosti CDF opět na veličinách $THD_{I,\check{C}SN}$, $I_{3,h\%}$ a $I_{3\%}$. Tyto veličiny jsou definovány jako:

Celkové harmonické zkreslení

$$THD_{I,\check{C}SN} = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^n I_h^2}}{I_1} \quad h = 1, 3, 5, 7 \dots$$

Poměrný proud všech harmonických, které přispívají do nulové symetrické složky

$$I_{3,h\%} = \frac{\sqrt{\sum_{h=3,i}^n I_h^2}}{I_1} \quad i = 1, 3, 5, 7 \dots$$

Poměrný proud 3. harmonické složky

$$I_{3\%} = \frac{I_{\check{s}}}{I_1}$$

Protože vlivem zatížení nesmí dojít k překročení dovoleného tepelného namáhání celého kabelu, ale ani jeho částí musí, se sledovat nejen CDF_K , tedy celého kabelu, ale i CDF_N , tedy pro střední vodič. Výsledný CDF pak vznikne jako minimální funkce těchto omezení.

Pro měření bylo vybráno 7 typů odběrů, které se dají považovat za zástupce spotřebičů, nacházejících se v kancelářských prostorách. Jejich přehled je uveden v *Tab.1*. Uvažujme je jako základní prvky pro pozdější výpočet.

1	Žárovka se snižovacím transformátorem 230/12V 50Hz 60VA
2	Kompaktní zářivka 18W s indukčním předřadníkem TRIDONIC EC 18 A27 230V 50Hz;
3	Halogenidová výbojka 400W s indukčním předřadníkem TRM H/400 PA-230
4	Neřízený jednofázový usměrňovač
5	Osobní počítač se zdrojem 350W
6	UPS 700VA/420W
7	Žárovka 100W

Tab.1 Vybrané typy zátěží

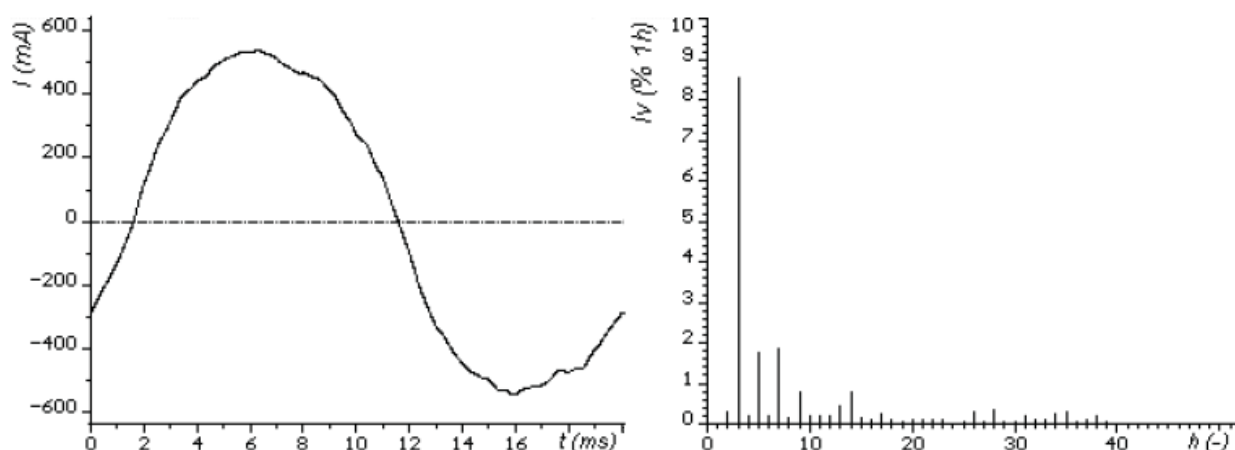
U všech základních prvků byla změřena a fázová a amplitudová spektra a vypočteny hodnoty $i_{N,F}$, $THD_{I,\check{C}SN}$, $I_{3,h\%}$, $I_{3\%}$ a CDF_K a CDF_N . Kombinacemi jednotlivých prvků mezi sebou pak vzniknou různé typy odběru s různým odběrovým proudem, různě zkresleným harmonickými.

7.1 Amplitudová a fázová spektra základních prvků

U jednotlivých prvků byla vyhledána v katalogových údajích, zjištěna simulací na matematickém modelu nebo proměřena amplitudová a fázová spektra, která byla následně použita při dalším výpočtu. K simulaci průběhů byl použit program PSpice a při měření byl použit analyzátor Chauvin Arnoux – typ C.A 83334.

7.1.1 Žárovka se snižovacím transformátorem 230/12V, 50Hz, 60VA

U tohoto typu odběru byla naměřena spektra, která jsou znázorněna na Obr.18.



Obr. 18: Fázové a amplitudové spektrum žárovky se snižovacím transformátorem [4]

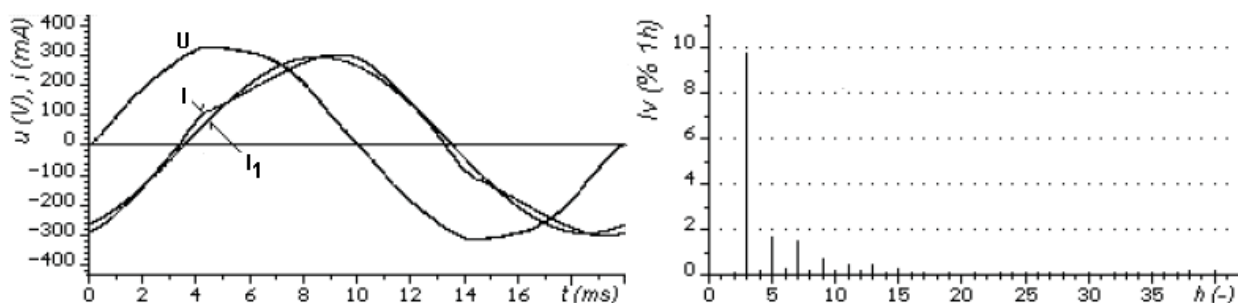
Výpočtem byly posléze určeny hodnoty vedené v Tab.2.

$\cos\varphi$	0.85
THD	8.92%
$I_{3h\%}$	8.55%
$I_{3\%}$	8.50%
$i_{N,F}$	0.255
CDF_K	0.996

Tab.2 Vypočtené hodnoty pro žárovku se snižovacím transformátorem

7.1.2 Kompaktní zářivka s indukčním předřadníkem

Amplitudové a fázové spektrum je znázorněno na Obr.19.



Obr. 19: Fázové a amplitudové spektrum kompaktní zářivky [4]

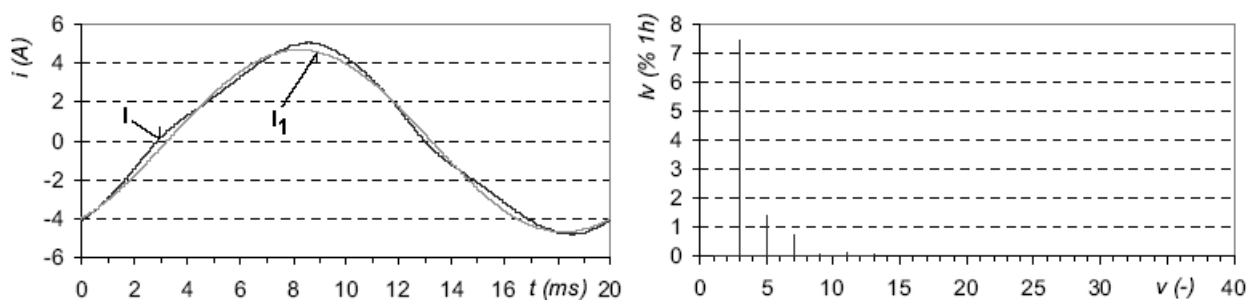
Vypočtené hodnoty udává Tab.3.

$\cos\varphi$	0.48
THD	10.16%
$I_{3h\%}$	9.84%
$I_{3\%}$	9.80%
$i_{N,F}$	0.293
CDF_K	0.995

Tab.3 Vypočtené hodnoty pro kompaktní zářivku

7.1.3 Halogenidová výbojka 400W s indukčním předřadníkem

Amplitudové a fázové spektrum je znázorněno na Obr.20.



Obr. 20: Fázové a amplitudové spektrum halogenidové výbojky [4]

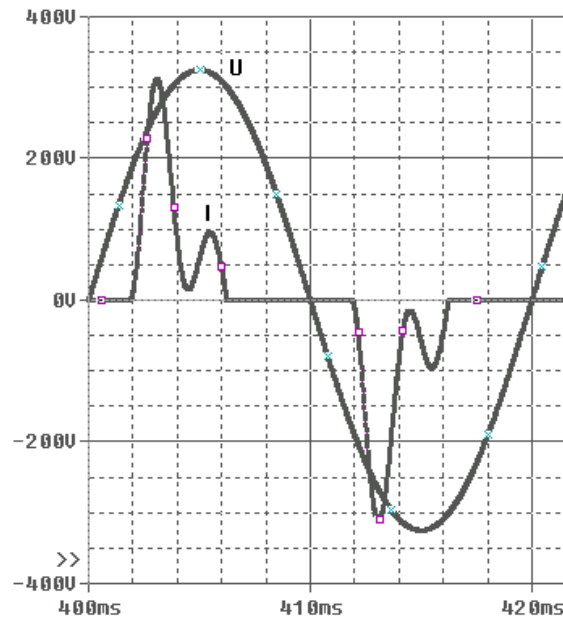
Vypočtené hodnoty udává Tab.4.

$\cos\varphi$	0.66
THD	7.62%
$I_{3h\%}$	7.50%
$I_{3\%}$	7.50%
$i_{N,F}$	0.224
CDF_K	0.997

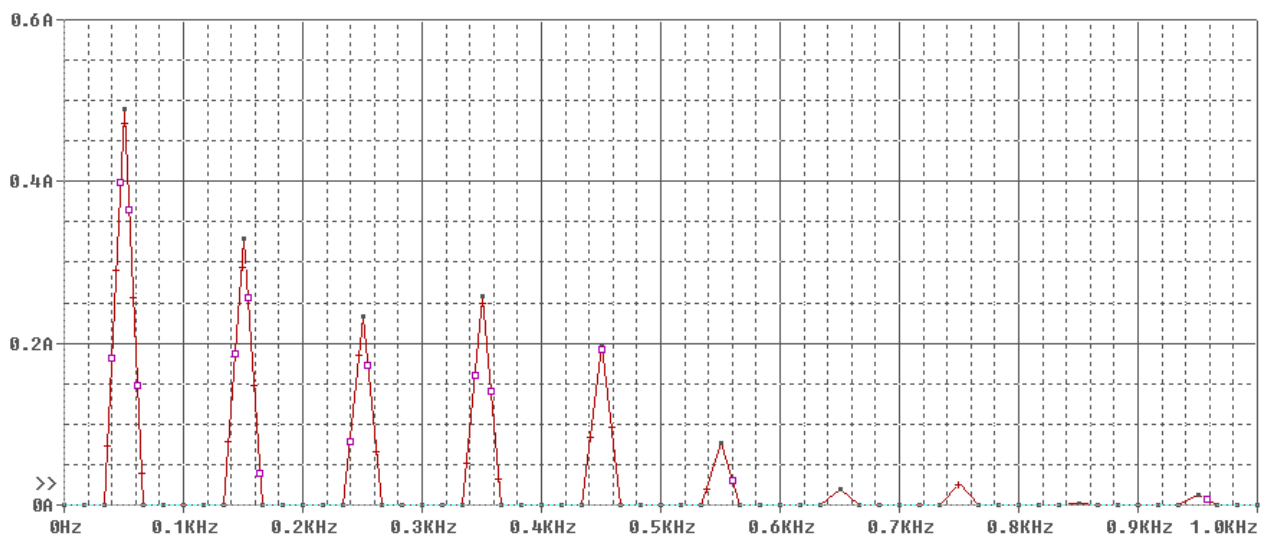
Tab.4 Vypočtené hodnoty pro halogenidovou výbojku

7.1.4 Usměrňovač

Amplitudové a fázové spektrum je znázorněno na Obr.21. a Obr 22.



Obr. 21: Fázové spektrum usměrňovače



Obr. 22: Amplitudové spektrum usměrňovače

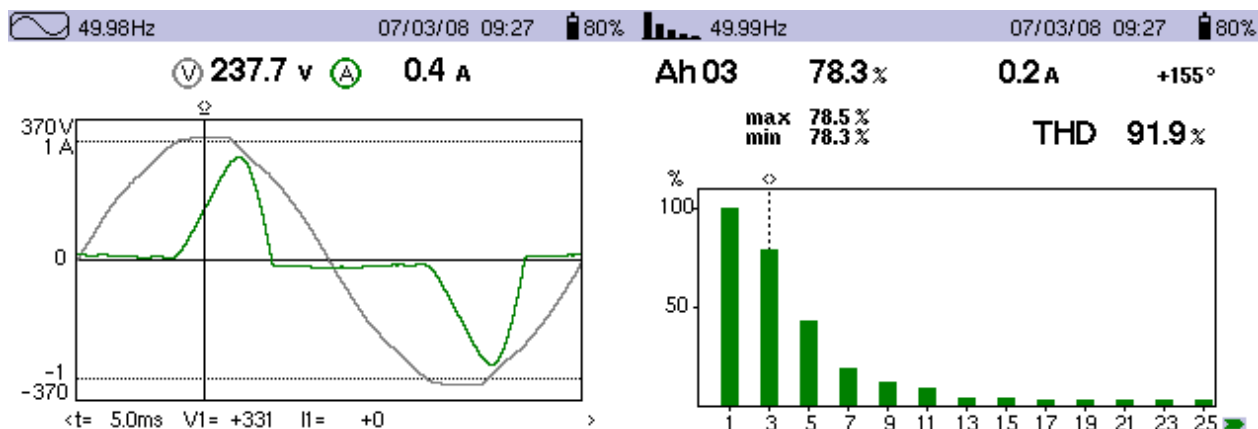
Vypočtené hodnoty pro usměrňovač udává Tab.5.

$\cos\varphi$	1
THD	112,44%
$I_{3h\%}$	86,87%
$I_{3\%}$	85,57%
$i_{N,F}$	1,732
CDF_K	0.665

Tab.5 Vypočtené hodnoty pro usměrňovač

7.1.5 Osobní počítač

Amplitudové a fázové spektrum je znázorněno na Obr.23.



Obr. 23: Fázové a amplitudové spektrum osobního počítače

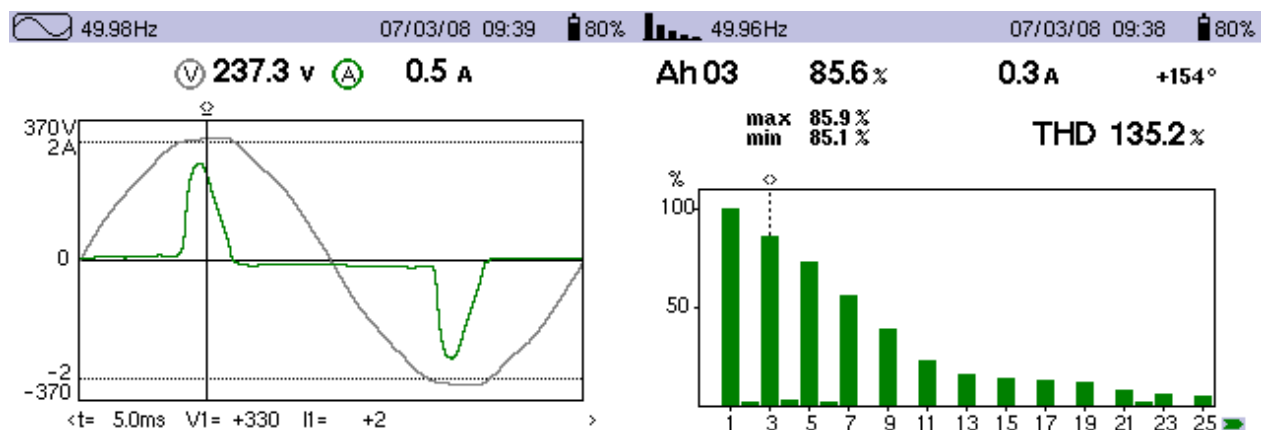
Vypočtené hodnoty pro osobní počítač udává Tab.6.

$\cos\varphi$	1
THD	92,88%
$I_{3h\%}$	78,58%
$I_{3\%}$	77,70%
$i_{N,F}$	1,727
CDF_K	0.733

Tab.6 Vypočtené hodnoty pro osobní počítač

7.1.6 UPS – zdroj nepřetržitého napájení

Amplitudové a fázové spektrum je znázorněno na Obr.24.



Obr. 24: Fázové a amplitudové UPS

Vypočtené hodnoty pro UPS udává Tab.7.

$\cos\varphi$	1
THD	144,69%
$I_{3h\%}$	101,57%
$I_{3\%}$	91,10%
$i_{N,F}$	1,732
CDF_K	0.569

Tab.7 Vypočtené hodnoty pro UPS

7.1.7 Žárovka 100W

Vypočtené hodnoty pro žárovku udává Tab.8.

$\cos\varphi$	1
THD	0%
$I_{3h\%}$	0%
$I_{3\%}$	0%
$i_{N,F}$	0
CDF_K	1

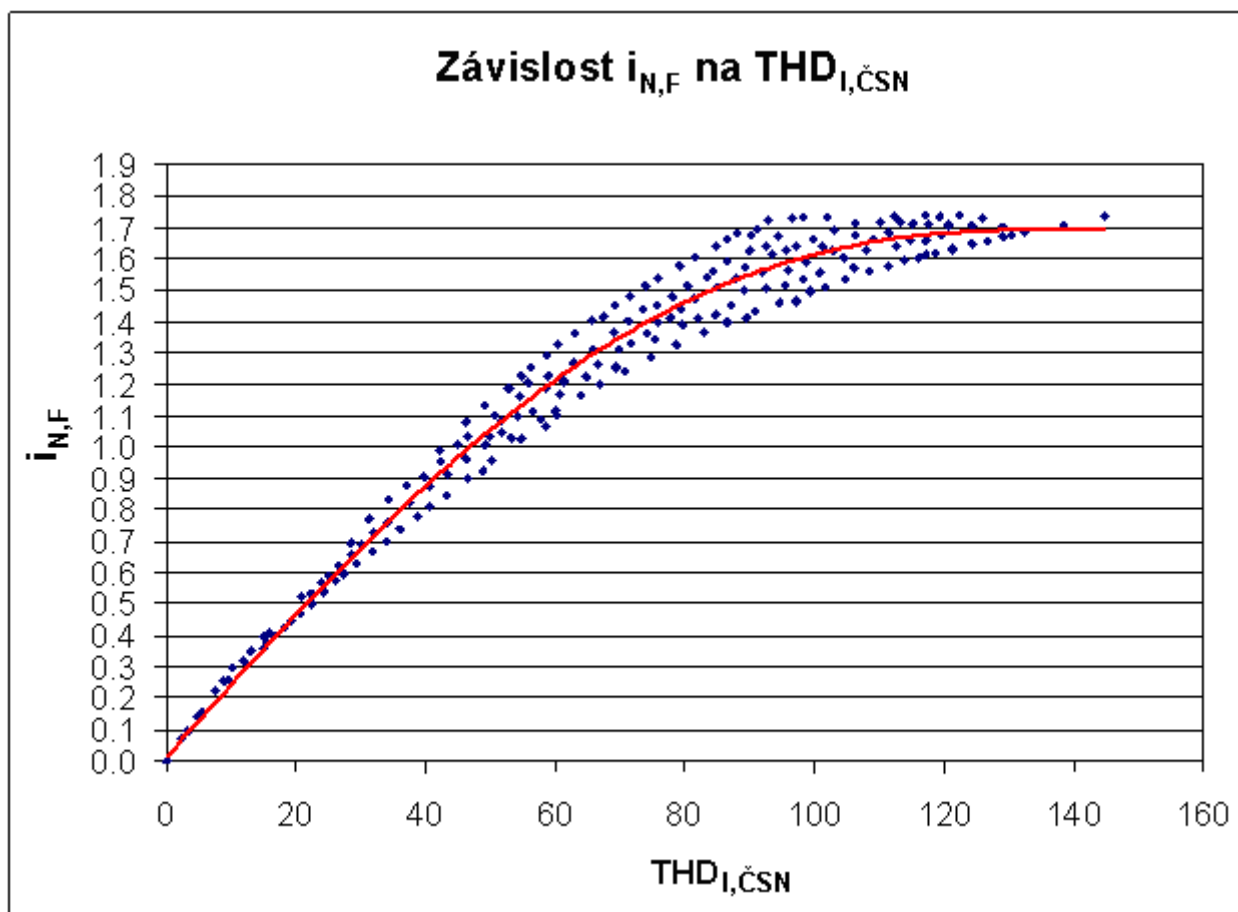
Tab.8 Vypočtené hodnoty pro žárovku 100W

7.2 Výsledné závislosti

Aby bylo možné znázornit závislosti velikosti poměrného proudu ve středním vodiči $i_{N,F}$ a CDF_K popřípadě CDF_N na $THD_{I,ČSN}$, $I_{3.h\%}$, $I_{3\%}$ bylo nutné vytvořit uměle další odběry. Kromě odběrů samotných základních prvků, byly tedy vytvořeny, jejich různými kombinacemi, takové odběry, aby bylo pokryto co možná nejširší pásmo hodnot $THD_{I,ČSN}$, $I_{3.h\%}$, $I_{3\%}$. Postupným přidáváním nebo odebráním jednotlivých základních prvků byly modelovány zátěže s různě deformovaným odběrem, tedy i s různými hodnotami veličin $THD_{I,ČSN}$, $I_{3.h\%}$, $I_{3\%}$. Z těchto odběrů bylo posléze vypočteno dostatečné množství hodnot potřebných pro vynesení závislostí. Všechny vygenerované kombinace jsou uvedeny v příloze.

7.2.1 Závislost $i_{N,F}$ na $THD_{I,ČSN}$

Výsledná závislost je zobrazena na Obr.25.



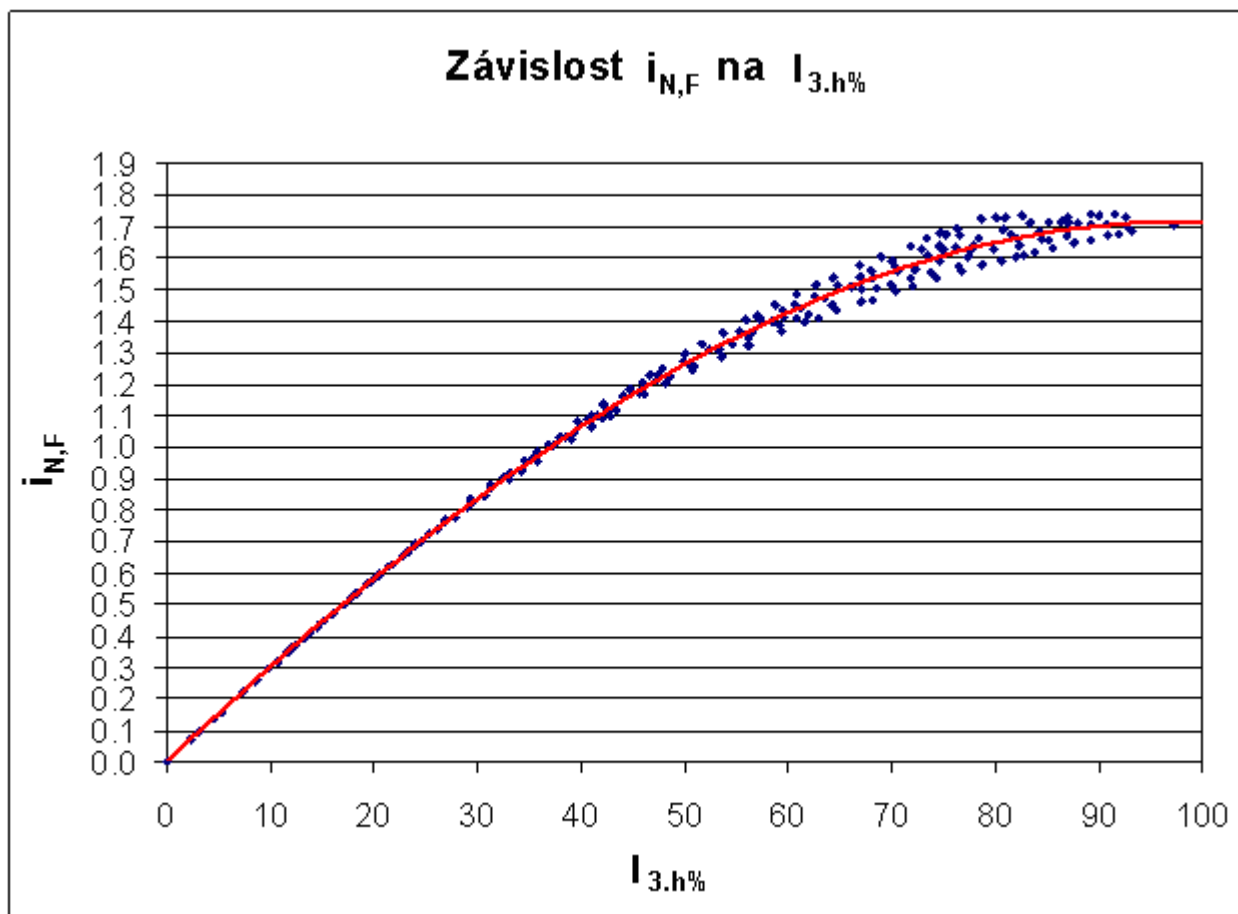
Obr. 25: Závislost $i_{N,F}$ na $THD_{I,ČSN}$

Výslednou závislost lze aproximovat funkcí

$$y = -1.10^{-7} \cdot x^3 + 7.10^{-7} \cdot x^2 + 0.022857 \cdot x + 0.013395$$

7.2.2 Závislost $i_{N,F}$ na $I_{3,h\%}$

Výsledná závislost je zobrazena na Obr.26.



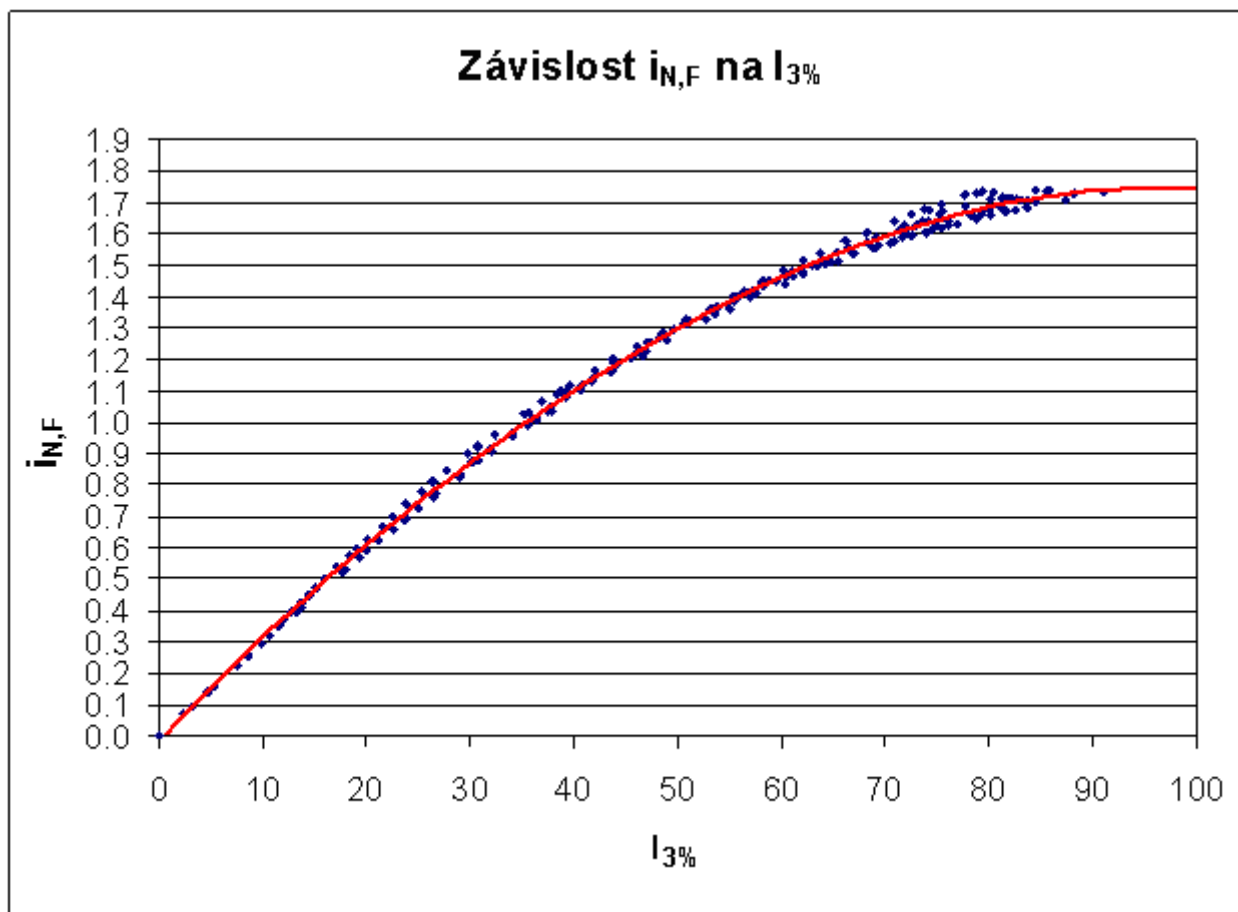
Obr. 26: Závislost $i_{N,F}$ na $I_{3,h\%}$

Výslednou závislost lze aproximovat funkcí

$$y = -4.10^{-9} \cdot x^3 - 101.10^{-6} \cdot x^2 + 0.031347x - 0.001510$$

7.2.3 Závislost $i_{N,F}$ na $I_{3\%}$

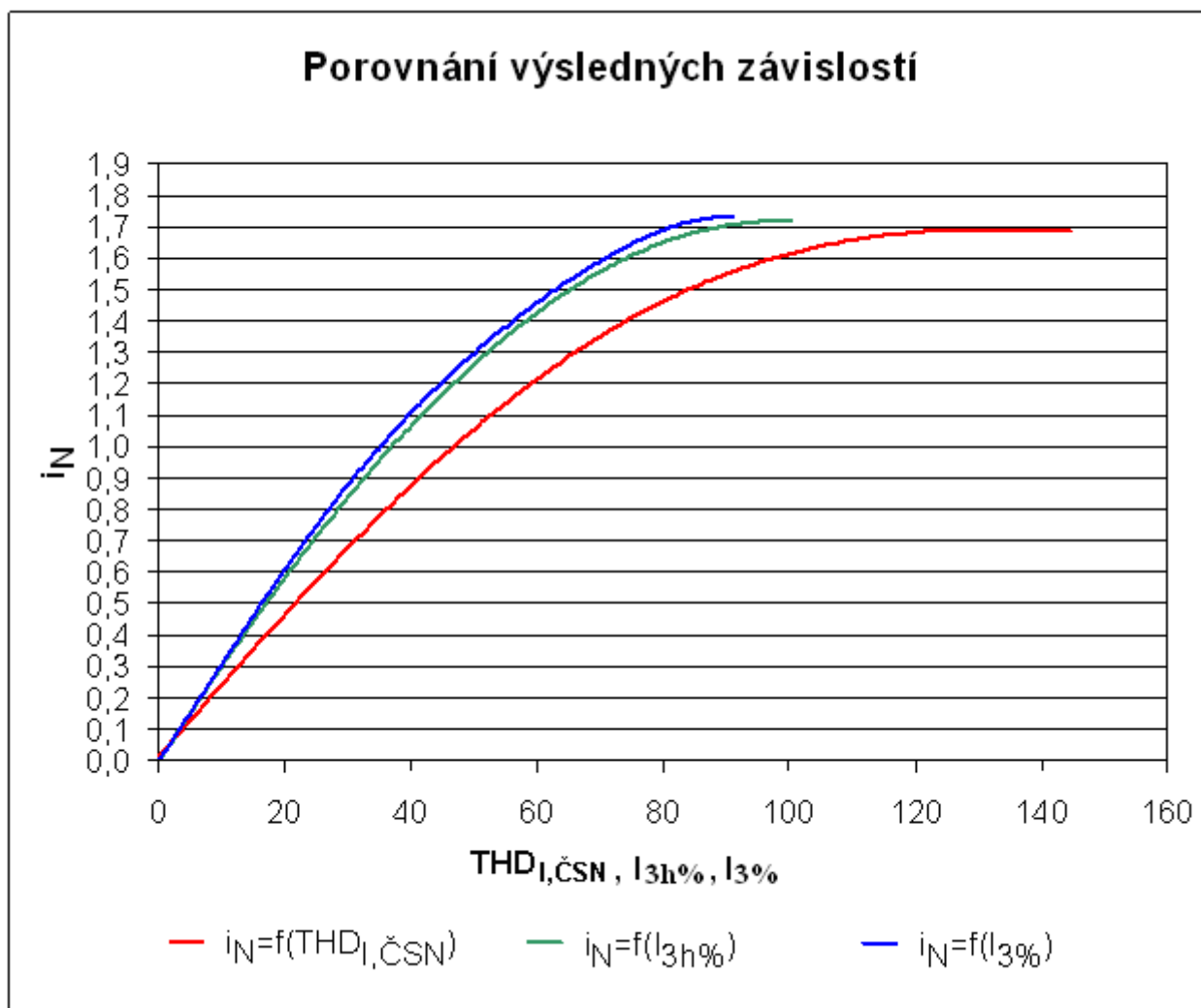
Výsledná závislost je zobrazena na Obr.27.



Obr. 27: Závislost $i_{N,F}$ na $i_{3\%}$

Výslednou závislost lze aproximovat funkcí

$$y = 2,10^{-7} \cdot x^3 - 233 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 + 0.035576 \cdot x - 0.018891$$

7.2.4 Vyhodnocení závislosti $i_{N,F}$ 

Obr. 28: Porovnání aproximujících funkcí jednotlivých závislostí

Z grafů vynesných závislostí je vidět, že u první závislosti $i_{N,F}=f(THD_{I,ČSN})$ mají vypočtené hodnoty největší rozptyl kolem aproximující křivky. Tedy pro shodné hodnoty $THD_{I,ČSN}$ může ve středním vodiči téci značně rozdílný proud. Zatímco například u hodnoty $THD_{I,ČSN} = 40\%$ se hodnoty poměrného proudu mohou lišit v rozmezí 0,81 až 0,92 u vyšších hodnot $THD_{I,ČSN}$ se tento rozptyl zvyšuje a je maximální v oblasti $THD_{I,ČSN} = 80-90\%$, kde se jedná například pro konkrétní hodnotu $THD_{I,ČSN} = 90\%$ o hodnoty poměrného proudu středním vodičem 1,41 až 1,70. Zde už činí rozptyl poměrných hodnot až 0,3 což může znamenat až 21,27% chybu v uvažování velikosti proudu středním vodičem.

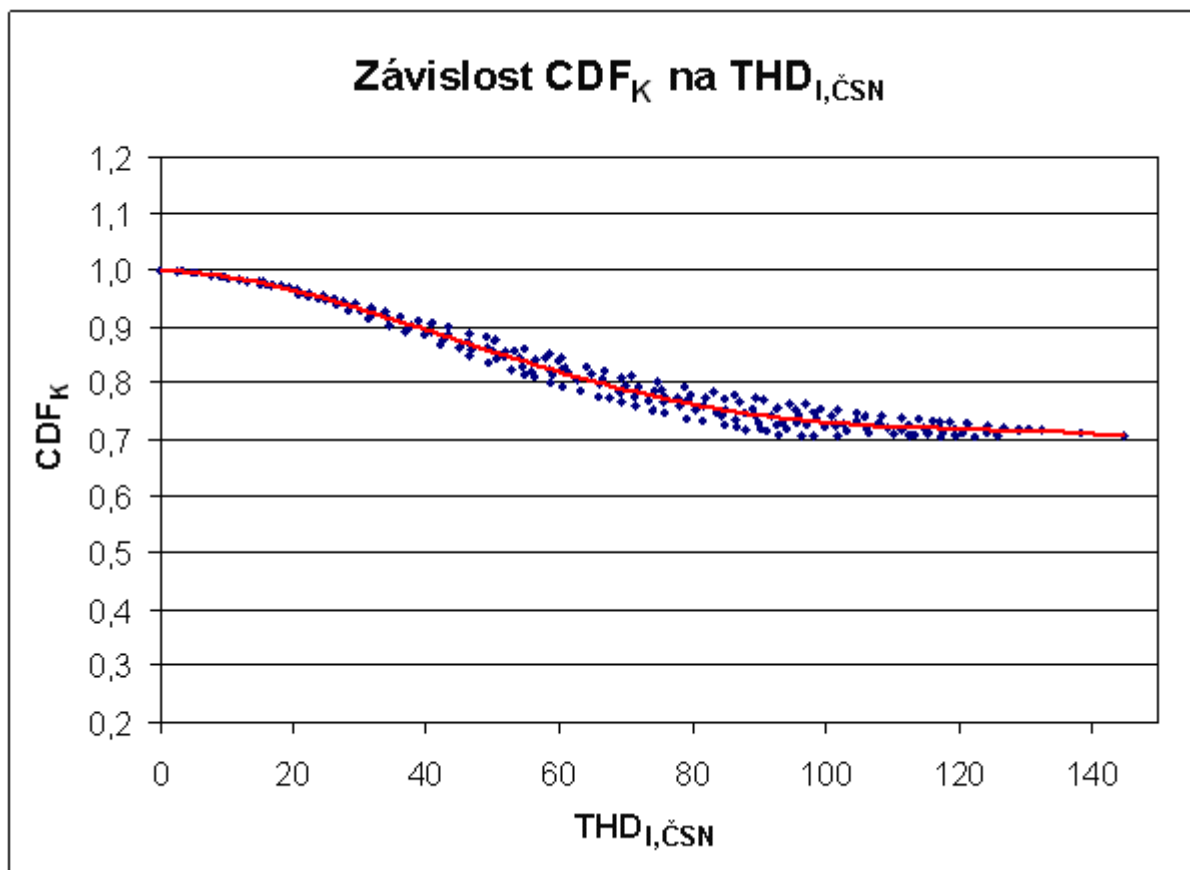
O poznání přesnější je v tomto směru druhá závislost $i_{N,F}=f(I_{3,h\%})$, kde je rozptyl až do hodnoty zhruba $I_{3,h\%} = 50\%$ menší než 0,05, odkud se dále zvyšuje a maximálních hodnot dosahuje mezi $I_{3,h\%} = 75-85\%$. Maximum rozptylu činí 0,148 pro hodnotu $I_{3,h\%} = 78,6\%$. Tento rozptyl pak může způsobit chybu 9,3% při určování velikosti proudu středním vodičem.

U třetí závislosti, kde $i_{N,F}=f(I_{3\%})$, je situace nejlepší. Do hodnot $i_{N,F} = 68\%$ se rozptyl hodnot pohybuje pod 0,05 a dále pak roste s maximem mezi $i_{N,F} = 72-82\%$ a dosahuje maximální hodnoty 0,09 což by mohlo mít za následek 5,4% chybu v uvažování proudu středním vodičem, což je nejmenší chyba z uvažovaných charakteristik.

Z uvedeného vyplývá, že hodnocení zatížení středního vodiče je nejlépe uvažovat z velikosti poměrné hodnoty 3. harmonické složky proudu a nikoliv z často uváděné hodnoty $THD_{I, \check{C}SN}$. Díky aproximační funkci můžeme oproti ostatním dvěma závislostem určit velikost poměrného proudu ve středním vodiči s nejmenší chybou.

7.2.5 Závislost CDF_K na $THD_{I, \check{C}SN}$

Výsledná závislost je zobrazena na Obr.29.



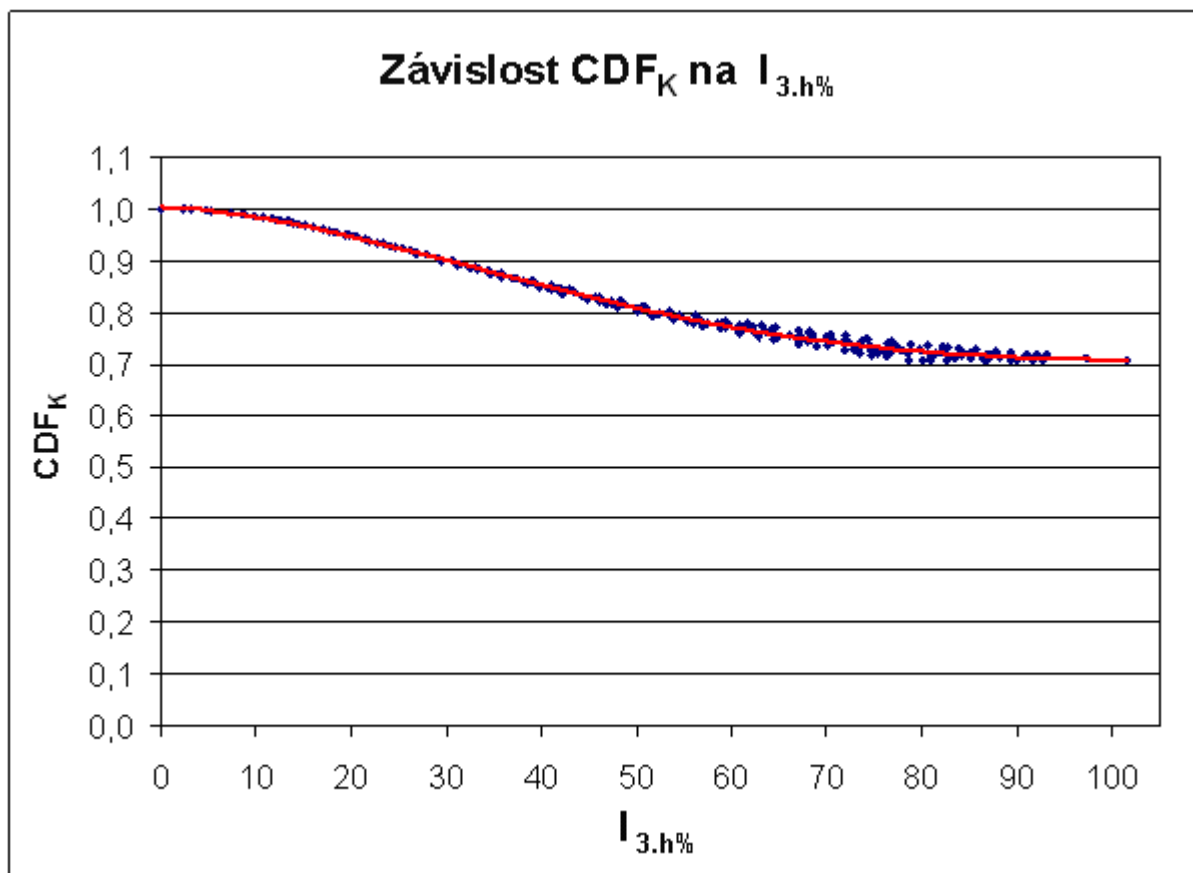
Obr. 29: Závislost CDF_K na $THD_{I, \check{C}SN}$

Výslednou závislost lze aproximovat funkcí

$$y = -3 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 + 1,090 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 102,226 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 - 51,825 \cdot 10^{-3} \cdot x + 0,99831$$

7.2.6 Závislost CDF_K na $I_{3.h\%}$

Výsledná závislost je zobrazena na Obr.30.



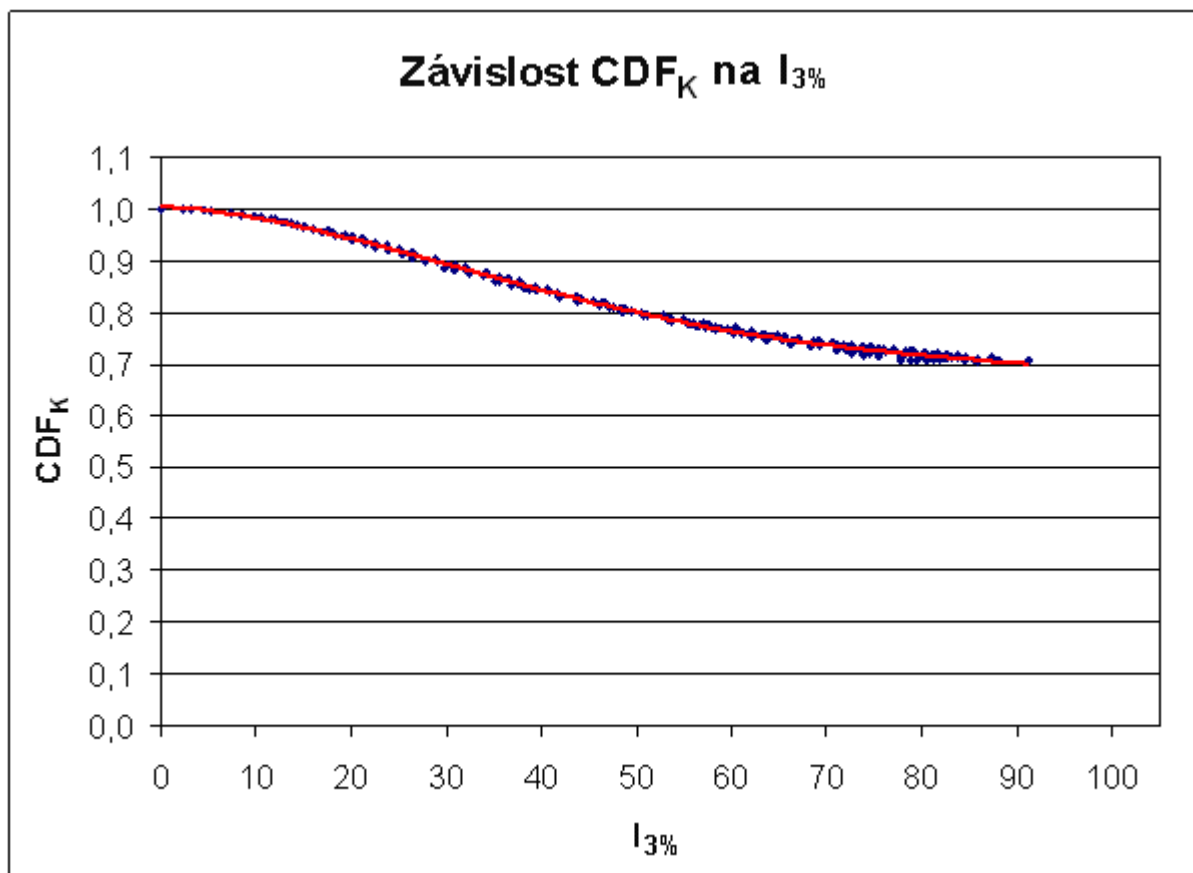
Obr. 30: Závislost CDF_K na $i_{3.h\%}$

Výslednou závislost lze aproximovat funkcí

$$y = -7 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 + 1,923 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 141,972 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 - 0,706 \cdot 10^{-3} \cdot x + 1.00387$$

7.2.7 Závislost CDF_K na $I_{3\%}$

Výsledná závislost je zobrazena na Obr.31.



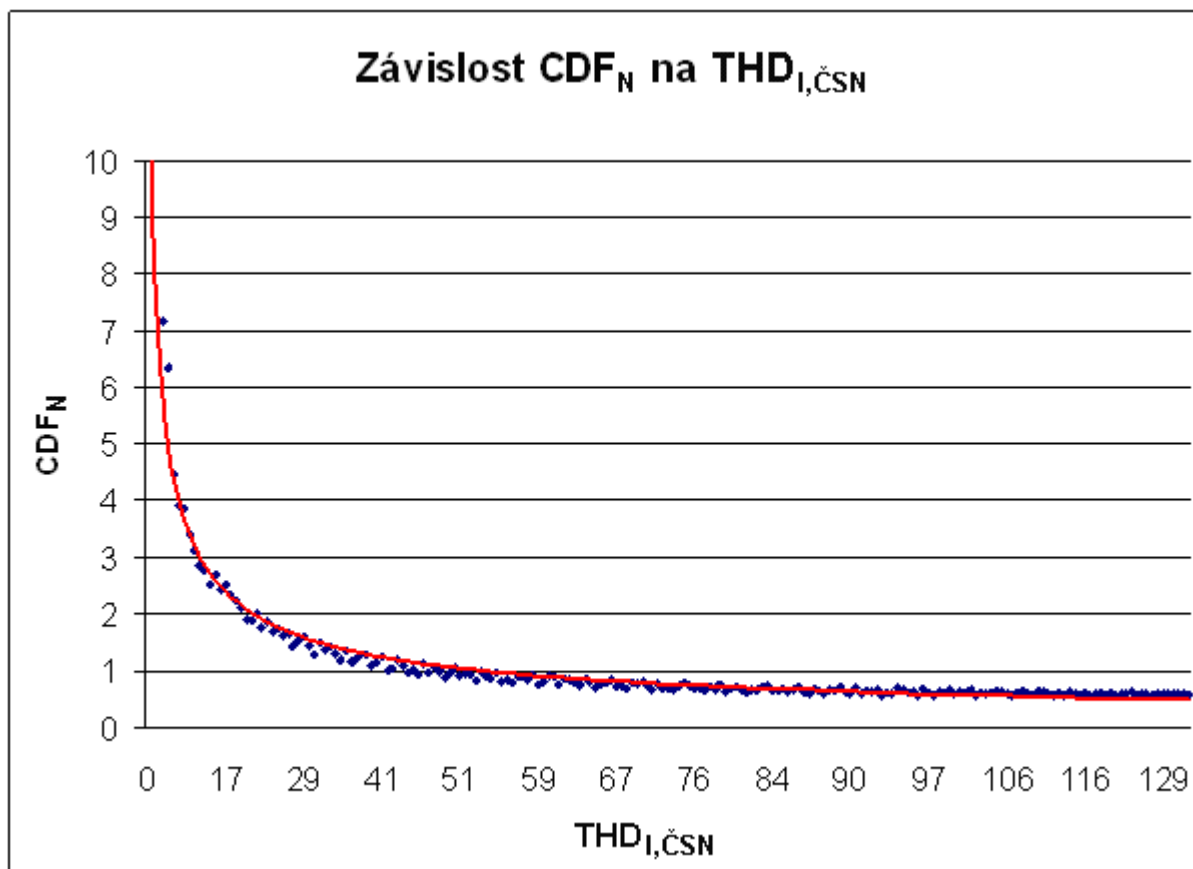
Obr. 31: Závislost CDF_K na $i_{3\%}$

Výslednou závislost lze aproximovat funkcí

$$y = -10 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 + 2,316 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 156,679 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 - 0,827 \cdot 10^{-3} \cdot x + 1,005$$

7.2.8 Závislost CDF_N na $THD_{I,ČSN}$

Výsledná závislost je zobrazena na Obr.32.



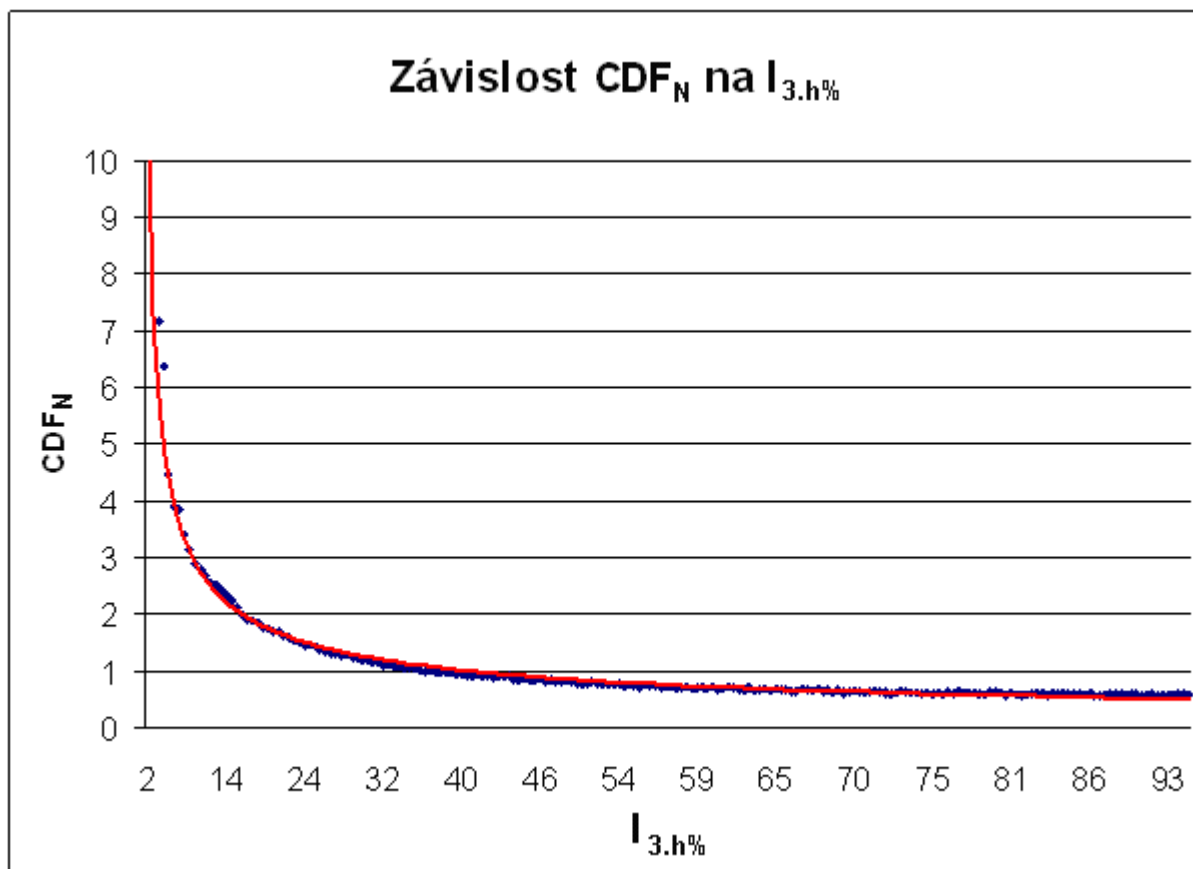
Obr. 32: Závislost CDF_N na $THD_{I,ČSN}$

Výslednou závislost lze aproximovat funkcí

$$y = 13,868 \cdot x^{-0,6279}$$

7.2.9 Závislost CDF_N na $I_{3.h\%}$

Výsledná závislost je zobrazena na Obr.33.



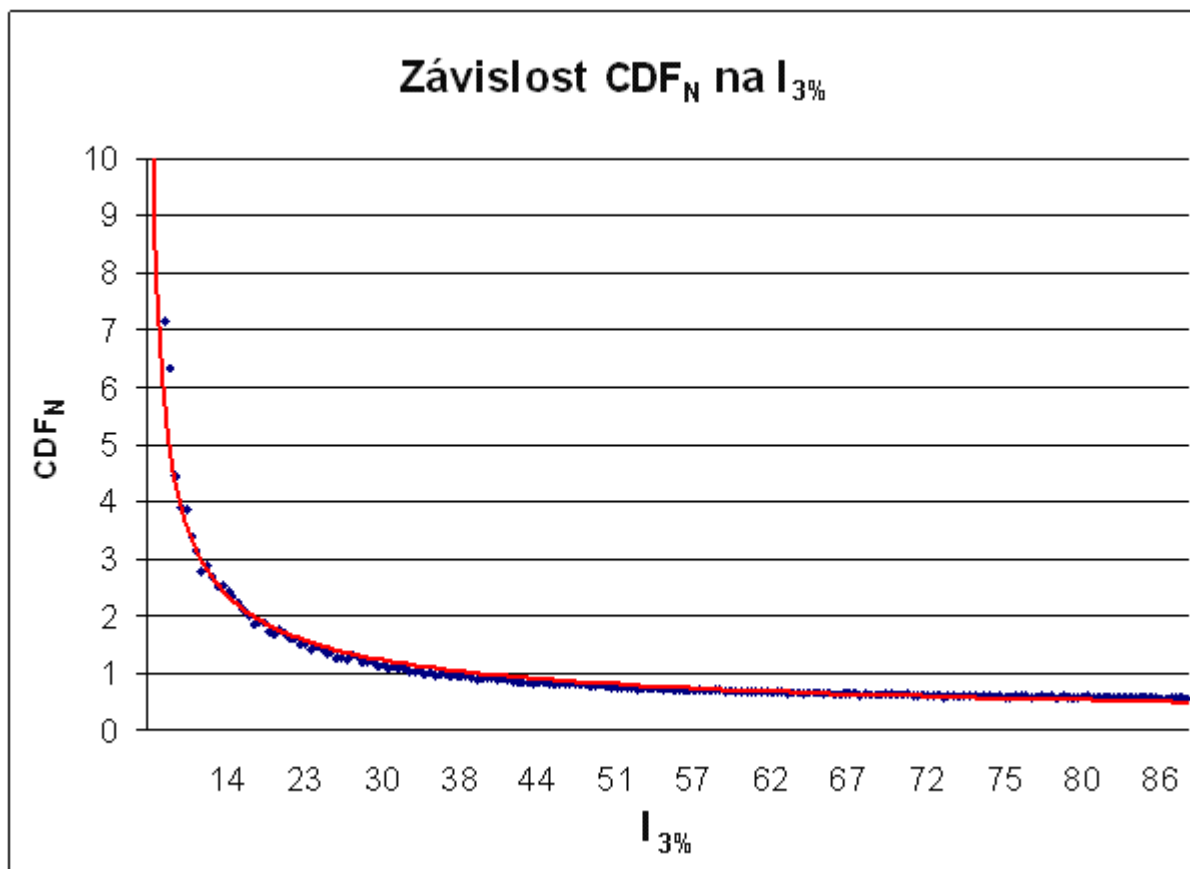
Obr. 33: Závislost CDF_N na $I_{3.h\%}$

Výslednou závislost lze aproximovat funkcí

$$y = 11,174 \cdot x^{-0,5827}$$

7.2.10 Závislost CDF_N na $I_{3\%}$

Výsledná závislost je zobrazena na Obr.34.



Obr. 34: Závislost CDF_N na $I_{3\%}$

Výslednou závislost lze aproximovat funkcí

$$y = 12,834 \cdot x^{-0,611}$$

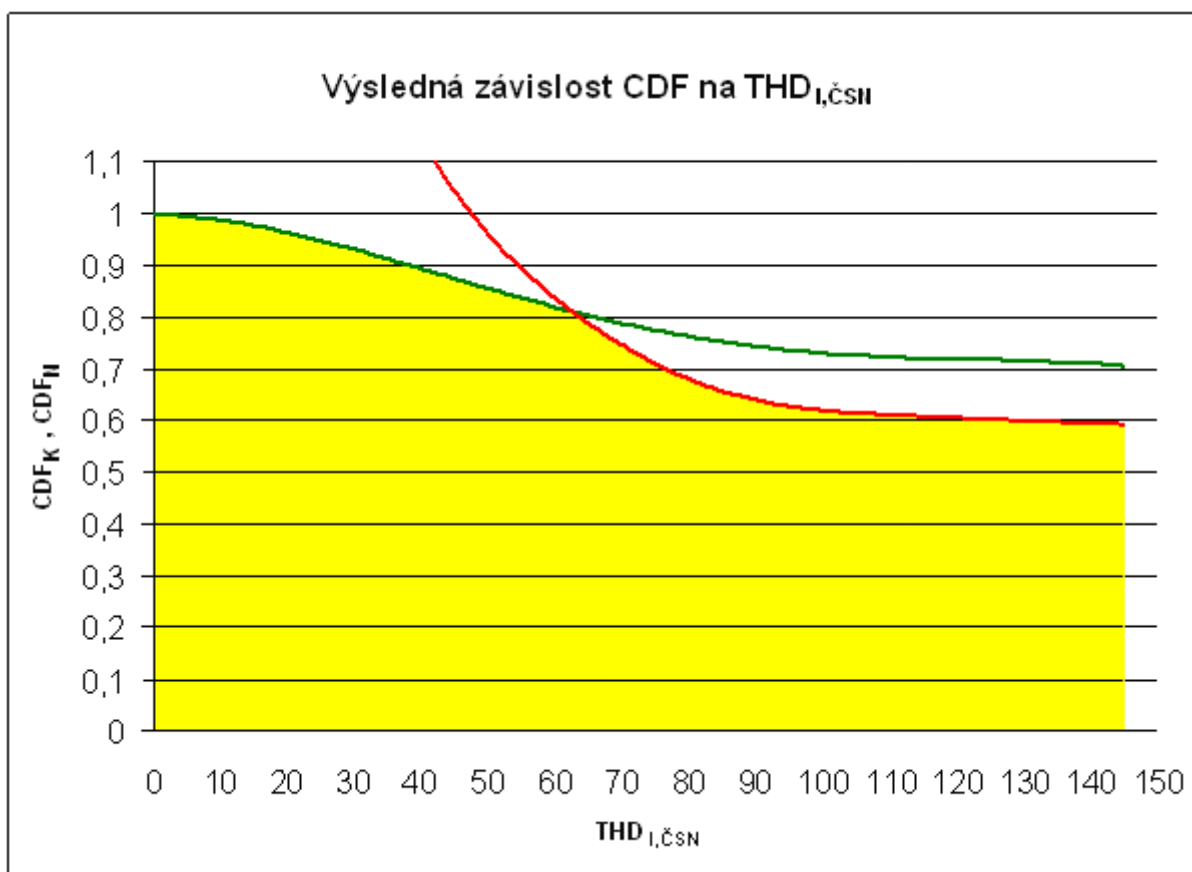
U závislostí CDF_K a CDF_N je situace obdobná závislostem $i_{N,F}$. V prvním případě, kde se sledoval $CDF_K = f(THD_{I,\check{C}SN}, I_{3h\%}, I_{3\%})$ je z grafů vidět, že závislosti se liší opět především rozptylem kolem aproximující křivky. Největší rozptyl nastává znova u závislosti $CDF_K = f(THD_{I,\check{C}SN})$. Menší rozptyl mají pak vypočtené hodnoty u závislostí $CDF_K = f(I_{3h\%})$ a $CDF_K = f(I_{3\%})$. Na rozptylu vypočtených hodnot pak závisí přesnost určení potřebného snížení zatížení, tedy CDF . V praxi by to totiž mohlo znamenat, že přestože uvážíme při dimenzování kabelu harmonické proudy, ale vyjdeme například z hodnoty $THD_{I,\check{C}SN}$, může být i tak kabel přetěžován. Díky nepřesnému určení CDF totiž snížení zatížení nebude dostatečné a nebude odpovídat ztrátám při procházejícím jmenovitém sinusovém proudu.

Závislosti $CDF_N = f(THD_{I,\check{C}SN}, I_{3h\%}, I_{3\%})$ jsou si obecně velmi podobné a je vidět, že u středního vodiče je nutné snižovat jeho zatížení zhruba od hodnot $THD_{I,\check{C}SN} = 47\%$, $I_{3h\%} = 36\%$ popřípadě $I_{3\%} = 35\%$, kdy CDF_N klesne pod hodnotu 1, což značí, že by byl od této hodnoty střední vodič přetěžován.

7.2.11 Výsledná závislost CDF na $THD_{I,ČSN}$

Stanovit na kolik musíme snížit zatížení kabelu tak, aby byly ztráty rovny ztrátám při procházejícím jmenovitým sinusovém proudu můžeme až z výsledného CDF . Ten je minimální funkcí všech omezení, protože vlivem zatížení nesmí dojít k překročení dovoleného tepelného namáhání celého kabelu, ale ani jeho částí. Finální podobu CDF tedy získáme složením závislostí CDF_K a CDF_N do jedné výsledné závislosti. Charakteristika CDF_K je v následujících závislostech zobrazena zelenou křivkou a charakteristika CDF_N červenou. Oblast, kde je sníženo zatížení dostatečně, aby nedocházelo k přetížení, je pak vynesena žlutě.

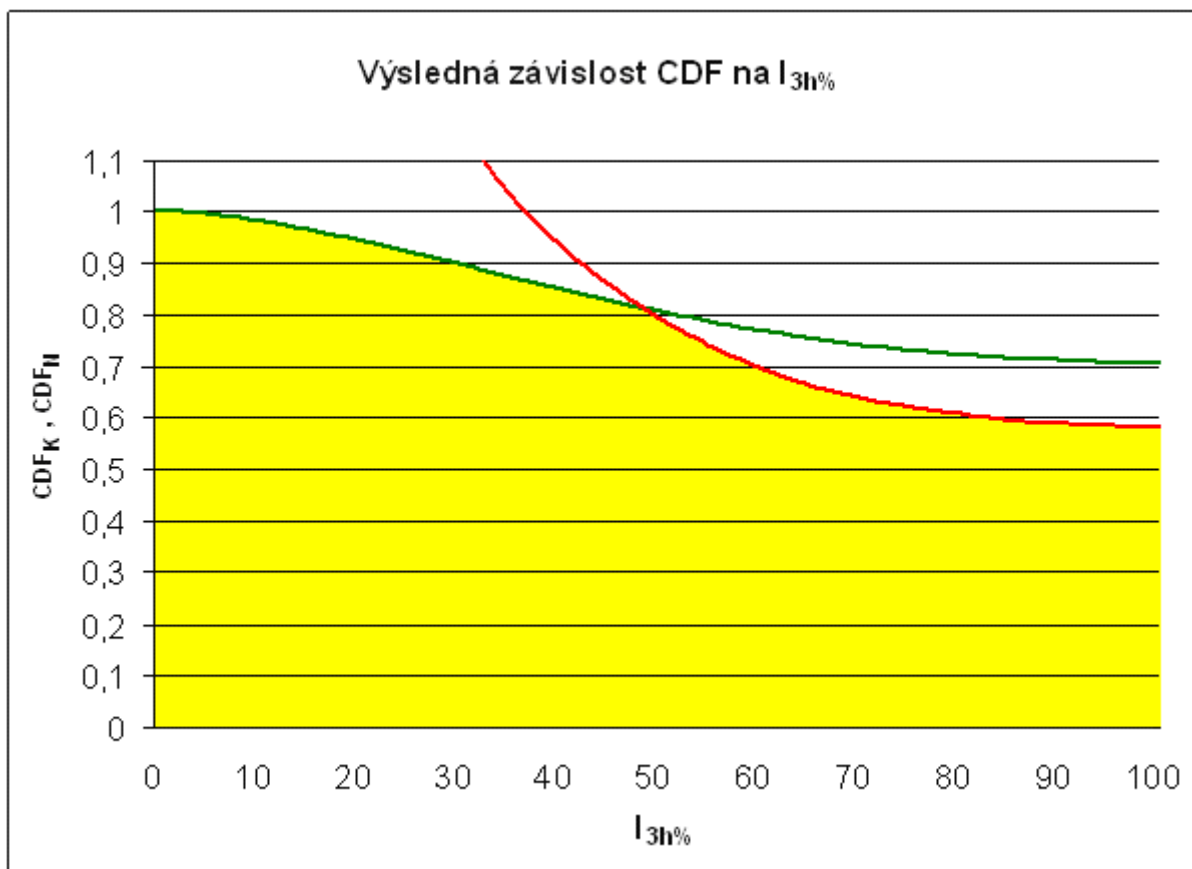
Výsledná závislost CDF na $THD_{I,ČSN}$ je zobrazena na Obr.35



Obr. 35: Závislost CDF na $THD_{I,ČSN}$

7.2.12 Výsledná závislost CDF na $I_{3h\%}$

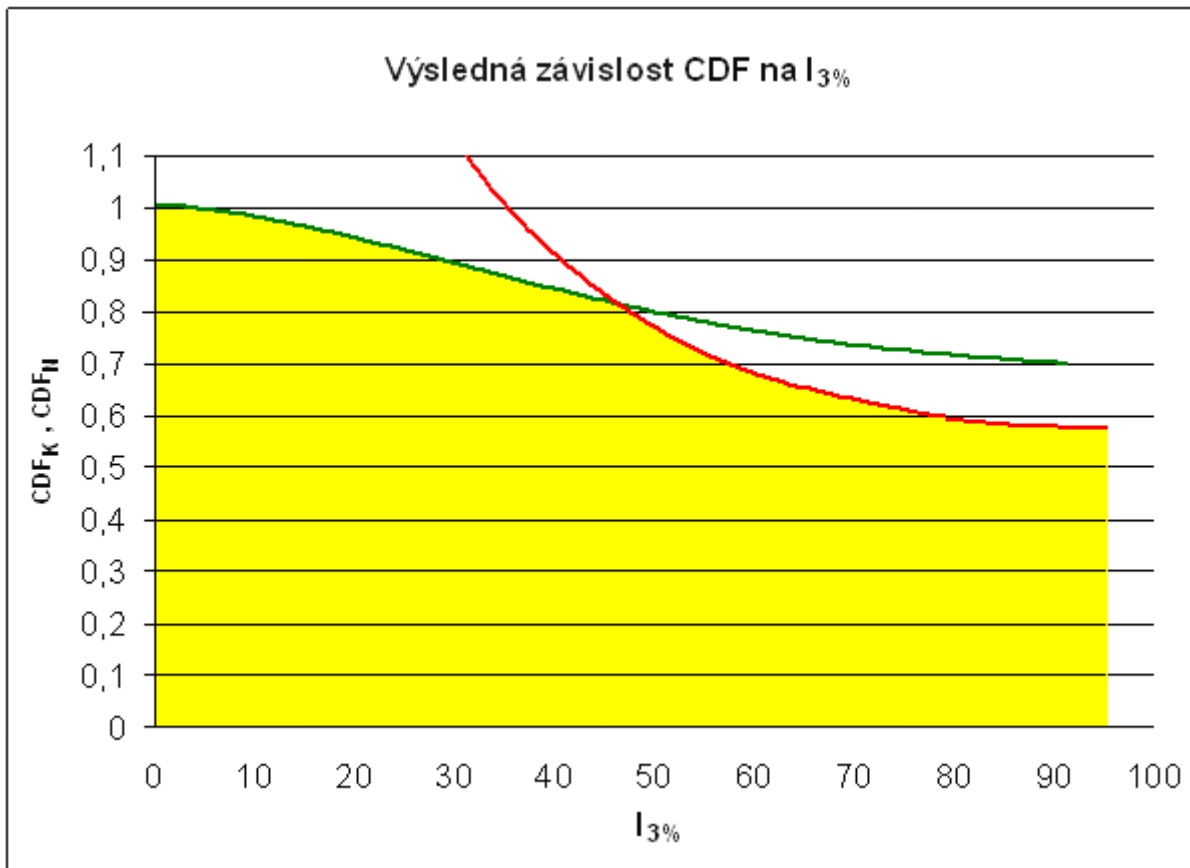
Výsledná závislost je zobrazena na Obr.36



Obr. 36: Závislost CDF na $I_{3h\%}$

7.2.13 Výsledná závislost CDF na $I_{3\%}$

Výsledná závislost je zobrazena na Obr.37



Obr. 37: Závislost CDF na $I_{3\%}$

Jak bylo řečeno, dovolené zatížení kabelových vedení je obvykle stanoveno na základě jejich dovoleného tepelného namáhání, které je způsobeno procházejícím proudem. Přičemž předpokladem je, že proud prochází pouze odpovídajícím počtem vodičů. Pokud bude, jak ve výpočtu předpokládáme, kabel zatížen nelineárními spotřebiči shodných elektrických vlastností generujících harmonické, které tvoří symetrickou zátěž v symetrické napájecí soustavě, bude proud středním vodičem nenulový. Jeho velikost je dána velikostí soufázových složek harmonických fázového proudu, které se ve středním vodiči ze všech tří fází sčítají. Tedy i středním vodičem protéká proud, a pak jsou v kabelu zdrojem tepla více než tři vodiče a je třeba snížit jejich dovolené zatížení. Nesmí totiž docházet k přetěžování kabelu, ale ani jeho částí.

Tomuto předpokladu odpovídá v grafech znázorněný CDF , vzniklý jako minimální funkce všech omezení. CDF tedy odpovídá oblasti vynesené žlutě. V této oblasti je sníženo zatížení dostatečně, aby nedocházelo k přetížení kabelu jako celku, ale ani jeho jednotlivých částí a ztráty jsou rovny ztrátám při procházejícím jmenovitým sinusovém proudu. Omezující charakteristiky CDF_K je vynesena zelenou křivkou a CDF_N červenou. Obecně platí, že zpočátku CDF charakteristiky má omezující vliv CDF_K a od určitého procenta $THD_{I,ČSN}$, $I_{3h\%}$ popřípadě $I_{3\%}$ se uplatní omezující vliv charakteristiky CDF_N . U charakteristiky $CDF=f(THD_{I,ČSN})$ určuje CDF křivka CDF_K až do hodnoty $THD_{I,ČSN}=49,05\%$, kde začíná mít omezující vliv charakteristika CDF_N . Obdobná situace je u závislosti $CDF=f(I_{3h\%})$ a $CDF=f(I_{3\%})$. Zpočátku má omezující vliv charakteristika CDF_K a od hodnot $I_{3h\%}=37,38\%$, popřípadě $I_{3\%}=36,44\%$ pak převáží omezující

vliv charakteristiky CDF_N . Obecně jsou si charakteristiky velmi podobné, především závislosti $CDF=f(I_{3h\%})$ a $CDF=f(I_{3\%})$ což vychází z podobných vypočtených hodnot následně podobných závislostí CDF_K a CDF_N .

8 MOŽNOSTI CHRÁNĚNÍ PROTI PŘETÍŽENÍ STŘEDNÍHO VODIČE

V nových, ale třeba i rekonstruovaných instalacích již nesmí být sdružována funkce ochranného a středního vodiče. To znamená zásadní používání 5. vodičů v třífázových a 3. vodičů v jednofázových rozvodech. Střední i ochranný vodič musí být vedeny samostatnými žilami kabelu. Samozřejmostí jsou dnes vodiče s měděnými jádry.

8.1 V soustavách s přímo uzemněným uzlem (sítě TN nebo TT)

U těchto sítí musí být učiněna opatření jisticím zařízením pro detekování nadproudu, které je přiměřené průřezu středního vodiče. Při vzniku nebezpečného nadproudu v nulovém vodiči vypíná toto zařízení krajní vodiče, přičemž vypnutí nulového vodiče není nezbytně nutné. V sítích kde je nulový vodič zároveň vodičem ochranným, tedy v sítích TN, se tento vodič nesmí odpojovat vůbec.

Pokud je předepsáno odpojování nulového vodiče, musí být použité jisticí zařízení uspořádáno tak, aby nulový vodič nemohl být v žádném případě vypnut dříve než krajní vodiče, a při zapínání musí být nulový vodič vždy připojen dříve než krajní vodiče. Nejvhodnější možností je mechanicky spřažený jistič.

8.2 V soustavách, ve kterých není uzel přímo uzemněn (sítě IT)

Pokud je nutné rozvedení nulového vodiče, musí být nulový vodič každého obvodu opatřen nadproudovým jisticím prvkem, který odpojuje všechny aktivní vodiče dotyčného proudového obvodu včetně nulového vodiče. I zde platí, že nulový vodič nesmí být v žádném případě vypnut dříve než krajní vodiče.

8.3 Opatření k omezení harmonických

K tomu, abychom se vyhnuli potenciálnímu poškození zařízení a aby byly dodrženy platné standardy a doporučení (např. norma IEEE 519-1992 nebo EN 61000-3-12), existuje dále několik různých metod odstranění harmonického zkreslení.

Nejznámějšími metodami jsou:

- tlumivka na vstupu usměrňovače,
- vestavěná tlumivka na výstupu usměrňovače,
- vícepulzní usměrňovače,
- pasivní filtr,
- aktivní filtr.

8.3.1 Tlumivka na vstupu/výstupu usměrňovače

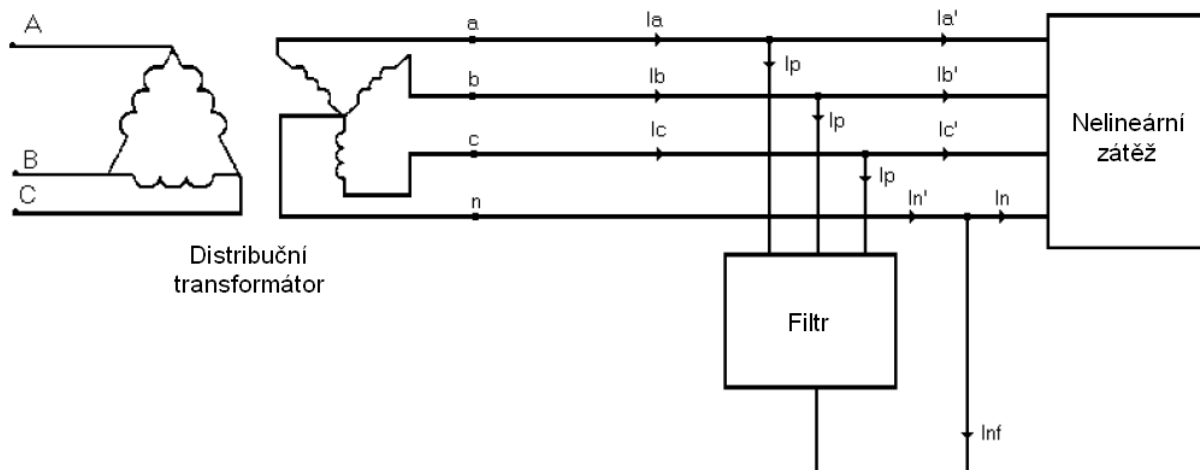
Nejrozšířenější a nejsnadnější metodou odstranění harmonického zkreslení je použití tlumivky na vstupu usměrňovače. Vstupní tlumivka vyhlazuje proud vycházející z měniče kmitočtu. Přičemž v porovnání s měničem bez tlumivky lze při použití vstupní tlumivky dosáhnout výrazně nižšího harmonického zkreslení. Podobného účinku jako při použití vstupní tlumivky lze dosáhnout i pomocí tlumivky vestavěné na výstupu usměrňovače. Výstupní tlumivky mají v porovnání s tlumivkami na vstupu menší velikost, vyšší účinnost a nevykazují žádný úbytek napětí na vstupu usměrňovače.

8.3.2 Vícepulzní usměrňovače

12- a 18pulzní usměrňovače byly dlouhou dobu používány jako standardní metoda snížení harmonického zkreslení u měničů kmitočtu. Teoreticky je 5. a 7. harmonická (u 12pulzního měniče také 11. a 13. harmonická) vyrušena pomocí transformátorů s fázovým posunem a s použitím dvou (nebo tří) 6pulzních diodových usměrňovačů. Výraznou nevýhodou vícepulzní metody odstraňování harmonického zkreslení je však sklon ke vzniku neideálního napájecího napětí. Protože vždy existuje určitá nerovnováha napětí nebo určité zkreslení harmonického pozadí, úplného odstranění 5. a 7. harmonické (11. a 13. harmonické) lze zřídka dosáhnout.

8.3.3 Pasivní filtr

Pasivní filtr může být aplikován centrálně nebo jen pro individuální zátěže. Pokud je filtrace prováděna co nejbližší k místu vzniku harmonických, filtrování zůstává efektivní i při mnoha druhých zátěžích, jež se vyskytují v kancelářských budovách. Nevýhodou je nutnost používat větší filtrovací kapacitu, než je aktuálně nutná (tedy nebereme ohled na různorodost zátěže) a rovněž jednotlivé malé filtry jsou více nákladné než centralizované jednotky. Jednou z výhod je omezení harmonických proudů na menší oblast instalace. Na druhou stranu, centralizovaný přístup umožňuje kombinovat pasivní filtry s kompenzací účiníku. Společné použití těchto funkcí umožňuje přijmout kroky pro potlačení rezonancí u harmonických frekvencí. Obvykle dochází k centralizování kompenzačních frekvencí. To umožňuje optimalizovat regulační stupně, redukovat počet nutných regulací a umožňuje korigovat vyšší hodnoty bez rizika samobuzení motorů. Jak však dochází ke změnám ve skladbě harmonických, je třeba zajistit, aby filtry byly i nadále funkční.



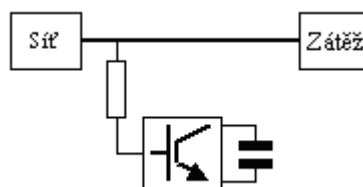
Obr. 38: Pasivní filtr

8.3.4 Aktivní filtr

Princip aktivních filtrů je znám již několik desetiletí, avšak realizace nebyla možná bez rychlých výkonových polovodičových součástek, které se začaly používat v poslední době. Jedná se především o IGBT tranzistory, pomocí kterých lze nyní realizovat filtrační zařízení s výkonem řádově jednotek MVA.

Aktivní filtry lze uvažovat jako paralelně nebo sériově zapojené generátory řízené vhodným regulačním systémem tak, aby i v dynamických stavech byla zajištěna požadovaná kompenzace nevhodných harmonických složek. Způsobem zapojení aktivního filtru do sítě pak lze vylepšit proud, napětí nebo obojí. Podle těchto požadavků lze aktivní filtry dělit následovně

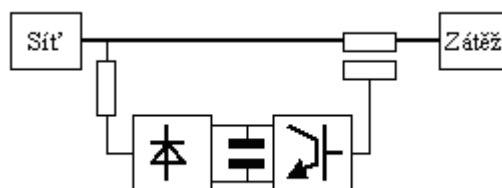
- Derivační (paralelní) aktivní filtry



Obr. 39: Derivační aktivní filtry [12]

Aktivní paralelní filtr je zapojen paralelně ke svorkám sítě a svorkám spotřebiče a je tvořen generátorem proudu. Tento filtr umožňuje upravit výstupní proud na požadovaný tvar.

- Sériové aktivní filtry



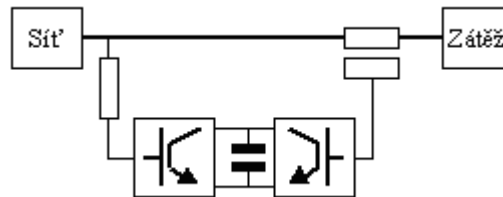
Obr. 40: Sériové aktivní filtry [12]

Podobně jako upravuje paralelně zapojený filtr proud, je zde upravováno napětí. To znamená, že filtr má schopnost udržovat amplitudu napětí, kompenzovat poklesy i špičky,

odstraňovat harmonické, zajišťovat symetrické rozložení napětí, ale také dodávat energii při výpadku napájecího napětí (za podmínky, že je filtr napájen nezávislým zdrojem).

Z popsaných vlastností obou způsobů zapojení je zřejmé, že derivační filtry upravují vlastnosti sítě směrem od zátěže ke zdroji (vyrovnávají rušivé účinky zátěže). Sériové filtry potom upravují síť směrem od napájecí strany ke spotřebiči, tzn. že, dodávají zátěži kvalitnější energii.

- Kombinované aktivní filtry



Obr. 41: Kombinované aktivní filtry [12]

Oba způsoby je možné zkombinovat v jeden celek a tím vznikne systém zajišťující jak vhodné napětí v místě připojení filtru, tak i definovaný odebíraného průběh proudu [12].

9 ZÁVĚR

Je zřejmé, že dlouhodobý trend stálého zvyšování užité hodnoty a hospodárnosti elektrických zařízení, vede ke stále rozsáhlejšímu používání spotřebičů s nelineárními nebo proměnnými provozními charakteristikami. Přímým důsledkem jsou zpětné vlivy takových spotřebičů na distribuční síť a s tím související opatření, která jednak snižují tyto vlivy na přípustnou míru, ale také je zohledňují již v metodice návrhu elektrických zařízení. Jednou z dotčených oblastí je dimenzování kabelových vedení a rozvodů právě s ohledem na měnící se charakter proudového zatížení.

Korektní návrh vhodného průřezu a typu kabelu tedy nespočívá v prostém výběru podle dovolených napěťových úbytků, ale měl by respektovat další podmínky, které ovlivňují provozní teplotu kabelu, a tím i jeho přípustné zatížení. K nepominutelným vlivům bezesporu patří:

- charakteristika provozu,
- charakteristika prostředí,
- charakteristika uložení,
- charakteristika zátěže.

Dosud běžně zažitým předpokladem je, že proud prochází pouze odpovídajícím počtem fázových vodičů, tedy tepelné ztráty jsou generovány pouze tímto počtem vodičů. Pokud však je kabel zatížen nelineárními spotřebiči shodných elektrických vlastností generujícími harmonické, které tvoří symetrickou zátěž v symetrické napájecí soustavě, bude proud středním vodičem nenulový. Jeho velikost je pak dána velikostí soufázových složek harmonických fázového proudu, které se ve středním vodiči ze všech tří fází sčítají. Pak tedy i středním vodičem protéká proud, v kabelu jsou zdrojem tepla více než tři vodiče a je třeba snížit dovolené zatížení kabelu.

V této práci jsem se tedy věnoval vzniku harmonických proudů, jejich důsledky a především jejich vlivu na kabelové sítě a zatížení středního vodiče. Tento vliv jsem posuzoval z pohledu snížení dovoleného zatížení v závislosti na nelineárním odběru zátěží.

Snížení dovoleného zatížení určuje *Cable Derating Factor* (*CDF*). Je definován jako minimální funkce všech omezení, tedy

$$CDF = \min[CDF_F; CDF_N; CDF_K]$$

protože nesmí docházet k přetěžování kabelu jako celku, ale ani jeho částí.

V práci jsem se věnoval určení tohoto *CDF* a poměrného proudu ve středním vodiči $i_{N,F}$ různých nelineárních odběrů a jejich závislostmi na veličinách $THD_{I,\check{C}SN}$, $I_{3,h\%}$, $I_{3\%}$. K tomuto účelu bylo vybráno 7 základních prvků, které byly určeny jako zástupci spotřebičů nacházejících se v kancelářských prostorech. U těchto základních prvků byla vyhledána v katalogových údajích, zjištěna simulací na matematickém modelu nebo proměřena amplitudová a fázová spektra, která byla následně použita při dalším výpočtu. Aby bylo možné znázornit závislosti velikosti poměrného proudu ve středním vodiči $i_{N,F}$ a *CDF* na $THD_{I,\check{C}SN}$, $I_{3,h\%}$, $I_{3\%}$ bylo nutné vytvořit uměle další odběry. Kromě odběrů samotných základních prvků, byly tedy vytvořeny, jejich různými kombinacemi, takové odběry, aby bylo pokryto co možná nejširší pásmo hodnot $THD_{I,\check{C}SN}$, $I_{3,h\%}$, $I_{3\%}$. Toho bylo dosaženo tak, že postupným přidáváním nebo odebráním jednotlivých základních prvků vznikaly zátěže s různě deformovaným odběrem, tedy i s různými

hodnotami veličin $THD_{I,\check{C}SN}, I_{3,h\%}, I_{3\%}$. Z těchto odběrů bylo posléze vypočteno dostatečné množství hodnot potřebných pro vynesení závislostí.

Výsledné závislosti $i_{N,F}=f(THD_{I,\check{C}SN}, I_{3,h\%}, I_{3\%})$ se od sebe liší především rozptylem vypočtených hodnot kolem aproximujících křivek. U první závislosti $i_{N,F}=f(THD_{I,\check{C}SN})$ mají vypočtené hodnoty největší rozptyl. Tedy pro shodné hodnoty $THD_{I,\check{C}SN}$ může ve středním vodiči téci značně rozdílný proud. Zatímco například u hodnoty $THD_{I,\check{C}SN} = 40\%$ se hodnoty poměrného proudu mohou lišit v rozmezí $i_{N,F}=0,81$ až $i_{N,F}=0,92$ u vyšších hodnot $THD_{I,\check{C}SN}$ se tento rozptyl zvyšuje a je maximální v oblasti $THD_{I,\check{C}SN} = 80-90\%$, kde se jedná například pro konkrétní hodnotu $THD_{I,\check{C}SN} = 90\%$ o hodnoty poměrného proudu středním vodičem $i_{N,F}=1,41$ až $i_{N,F}=1,70$. Zde už činí rozptyl poměrných hodnot až 0,3 což může znamenat až 21,27% chybu v uvažování velikosti proudu středním vodičem. O poznání přesnější je v tomto směru druhá závislost $i_{N,F}=f(I_{3,h\%})$, kde je rozptyl až do hodnoty zhruba $I_{3,h\%} = 50\%$ menší než 0,05, odkud se dále zvyšuje a maximálních hodnot dosahuje mezi $I_{3,h\%} = 75-85\%$. Maximum rozptylu činí 0,148 pro hodnotu $I_{3,h\%} = 78,6\%$. Tento rozptyl pak může způsobit chybu 9,3% při určování velikosti proudu středním vodičem. U třetí závislosti, kde $i_{N,F}=f(I_{3\%})$, je situace nejlepší. Do hodnot $i_{N,F}=68\%$ se rozptyl hodnot pohybuje pod 0,05 a dále pak roste s maximem mezi $i_{N,F}=72-82\%$ a dosahuje maximální hodnoty 0,09 což by mohlo mít za následek maximálně 5,4% chybu v uvažování proudu středním vodičem, což je nejmenší chyba z uvažovaných charakteristik.

U výsledných závislostí $CDF=f(THD_{I,\check{C}SN}, I_{3,h\%}, I_{3\%})$ je situace komplikovanější. Protože nesmí docházet k přetěžování kabelu jako celku, ale ani jeho částí je CDF definován jako minimální funkce všech omezení, tedy závislostmi $CDF_K=f(THD_{I,\check{C}SN}, I_{3,h\%}, I_{3\%})$, $CDF_F=f(THD_{I,\check{C}SN}, I_{3,h\%}, I_{3\%})$ a $CDF_N=f(THD_{I,\check{C}SN}, I_{3,h\%}, I_{3\%})$. Protože při výpočtech předpokládáme, že efektivní hodnota proudu se ve fázovém vodiči nemění, nemusíme uvažovat závislost $CDF_F=f(THD_{I,\check{C}SN}, I_{3,h\%}, I_{3\%})$, protože fázový vodič přetěžován nebude. Výsledná závislost CDF je tedy minimální funkcí omezení CDF_K a CDF_N . Závislosti $CDF_K=f(THD_{I,\check{C}SN}, I_{3,h\%}, I_{3\%})$ a $CDF_N=f(THD_{I,\check{C}SN}, I_{3,h\%}, I_{3\%})$ se od sebe liší podobně jako u závislostí $i_{N,F}=f(THD_{I,\check{C}SN}, I_{3,h\%}, I_{3\%})$ především rozptylem kolem aproximující křivky. Největší rozptyl nastává opět u závislosti vztahované k $THD_{I,\check{C}SN}$. Menší rozptyl mají vypočtené hodnoty u závislostí vztažených k $I_{3,h\%}$ a $I_{3\%}$. Na rozptylu vypočtených hodnot závisí přesnost určení potřebného snížení zatížení. V praxi by to totiž mohlo znamenat, že přestože uvažíme při dimenzování kabelu harmonické proudy, ale vyjdeme například z hodnoty $THD_{I,\check{C}SN}$, může být i tak kabel přetěžován. Díky nepřesnému určení CDF totiž snížení zatížení nebude dostatečné a nebude odpovídat ztrátám při procházejícím jmenovitým sinusovým proudem.

Výsledná závislost CDF vzniklá jako minimální funkce všech omezení je v grafech vynesena žlutě. V této oblasti je sníženo zatížení dostatečně, aby nedocházelo k přetížení kabelu jako celku, ale ani jeho jednotlivých částí a ztráty jsou rovny ztrátám při procházejícím jmenovitým sinusovým proudem. Obecně platí, že zpočátku CDF charakteristiky má omezující vliv CDF_K a od určitého procenta $THD_{I,\check{C}SN}$, $I_{3,h\%}$ popřípadě $I_{3\%}$ se uplatní omezující vliv charakteristiky CDF_N . U charakteristiky $CDF=f(THD_{I,\check{C}SN})$ určuje CDF charakteristika CDF_K až do hodnoty $THD_{I,\check{C}SN}=49,05\%$, kde začíná mít omezující vliv charakteristika CDF_N . Obdobná situace je u závislostí $CDF=f(I_{3,h\%})$ a $CDF=f(I_{3\%})$. Zpočátku má omezující vliv charakteristika CDF_K a od hodnot $I_{3,h\%}=37,38\%$, popřípadě $I_{3\%}=36,44\%$ pak převládá omezující vliv charakteristiky CDF_N .

Obecně jsou si charakteristiky velmi podobné, především závislosti $CDF=f(I_{3h\%})$ a $CDF=f(I_{3\%})$ což vychází z podobných vypočtených hodnot a následně podobných závislostí CDF_K a CDF_N .

Na základě provedených měření lze konstatovat, že při dimenzování kabelů by se vliv harmonických proudů rozhodně neměl podceňovat, protože mají značný vliv na celkové zatížení kabelu. Při uvažování vlivu harmonických proudů je pak nutné přihlédnout ke správným závislostem, podle toho, z jaké veličiny se při posuzování vlivu harmonických proudů, vychází. Nejčastěji uváděnou hodnotou je v tomto případě $THD_{I,\check{C}SN}$. Otázkou je, zda by nebylo vhodnější vliv harmonických posuzovat podle veličin $I_{3h\%}$ popřípadě $I_{3\%}$. Pokud totiž vyjdeme z naměřených závislostí CDF_K , CDF_N je vidět, že určení snížení zatížení podle velikosti $THD_{I,\check{C}SN}$ je nejnepřesnější možností a může vést k poměrně velké chybě jak v uvažování velikosti proudu středním vodičem, tak v určení CDF . Výsledkem by pak mohlo být poddimenzování kabelu i přes fakt, že při jeho návrhu byly vlivy harmonických proudů uvažovány.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Dugan, R.C., McGranahan, M., Santoso, S., Beaty, H.W. Electrical Power Systems Quality (2002), ISBN 0-07-138622-X
- [2] Arrillaga, J., Watson, N.R. Power System Harmonics (2004), ISBN 0-470-85129-5
- [3] András, D., Santarius, P., Gavlas, J., Kužela, M. Kvalita dodávané elektrické energie v sítích nízkého napětí (2001)
- [4] Drápela, J. Zpětné rušivé vlivy osvětlovacích soustav na napájecí síť. Disertační práce, Brno: VUT v Brně, 2006. s. 1-233
- [5] Harmonické zkreslení napájecí sítě, jeho definice, měření a praxe
http://www.mti.tul.cz/files/vke/harmonicke_zkresleni.pdf
- [6] Hazards of harmonics and neutral overload,
www.ptsdcs.com/whitepapers/24.pdf
- [7] Power system harmonics,
<http://www.alamedaelectric.com/Modicon%20Documents/AC%20Drive%20Power%20System%20Harmonics.pdf>
- [8] Neutral sizing in harmonic rich installations,
http://www.cda.org.uk/megab2/elecapps/PQ_Guide/351-neutral-sizing-in-harmonic-rich-installations.pdf
- [9] Neutral sizing,
<http://www.lpqi.org/lwslib/ktwse?page&mod=library&libid=8&fid=4&did=91&rid=1>
- [10] Understanding Power system harmonics,
http://users.ece.utexas.edu/~grady/Harmonics_Notes_Grady_June_2006_print.pdf
- [11] Analysis of the neutral conductor current,
<http://www.lpqi.org/lwslib/ktwse?page&mod=library&libid=8&fid=4&did=43&rid=1>
- [12] Elcom, Aktivní filtry - obecně
<http://www.elcom.cz/aplikovana-elektronika/produkty/clanek/146-aktivni-filtry---obecne.html>
- [13] An introduction to power system harmonics,
<http://myweb.dal.ca/gillm/Assets/harmonics.pdf>

Příloha 1: Tabulka kombinací základních prvků pro hledané závislosti, seřazená podle vypočteného CDF_K .

kombinace	Počet základních prvků v kombinaci							CDF_K
	1	2	3	4	5	6	7	
1	-	-	-	-	3	2	-	0,498
2	-	-	-	-	1	1	-	0,498
3	-	-	-	1	2	1	-	0,499
4	-	-	-	-	6	1	-	0,499
5	-	-	-	-	-	1	-	0,500
6	-	-	-	1	-	-	-	0,500
7	-	-	-	-	11	1	-	0,500
8	-	-	-	-	17	1	-	0,500
9	-	-	-	1	-	1	-	0,501
10	-	-	-	-	1	-	-	0,501
11	-	-	1	-	8	4	-	0,504
12	-	-	1	-	6	4	-	0,505
13	-	-	1	-	5	4	-	0,505
14	-	-	1	-	8	3	-	0,505
15	-	-	1	-	4	4	-	0,506
16	-	-	1	-	-	6	-	0,507
17	-	-	1	-	3	4	-	0,507
18	-	-	1	-	2	4	-	0,508
19	-	-	1	-	1	4	-	0,509
20	-	-	-	1	13	1	-	0,512
21	-	-	2	-	8	4	-	0,513
22	-	-	-	3	1	2	-	0,514
23	-	-	2	-	-	6	-	0,514
24	-	-	-	-	12	1	-	0,515
25	-	1	-	-	-	2	-	0,516
26	-	-	-	1	8	1	-	0,517
27	-	-	-	3	1	1	-	0,517
28	1	1	2	5	9	-	2	0,517
29	-	-	-	5	11	-	2	0,518
30	-	-	3	-	-	7	-	0,518
31	1	-	-	-	9	-	-	0,520
32	-	-	3	-	3	5	-	0,520
33	-	-	3	-	8	4	-	0,520
34	1	-	1	5	-	2	-	0,521
35	-	-	3	-	-	6	-	0,522
36	-	-	3	-	2	5	-	0,522
37	-	-	4	-	-	7	-	0,525
38	-	-	-	-	7	-	1	0,527
39	-	4	-	-	5	3	-	0,527
40	-	-	-	4	6	-	2	0,527
41	-	1	2	-	5	9	-	0,527
42	1	1	1	4	6	2	1	0,528
43	-	-	4	-	-	6	-	0,529
44	-	-	1	2	-	2	-	0,531
45	1	1	1	3	6	2	1	0,531
46	-	-	2	3	1	2	-	0,531
47	-	-	-	3	6	-	2	0,532
48	-	-	3	-	-	4	-	0,534

kombinace	Počet základních prvků v kombinaci							CDF _K
	1	2	3	4	5	6	7	
49	-	-	4	-	-	5	-	0,536
50	1	1	1	3	6	2	1	0,536
51	-	-	5	-	-	6	-	0,538
52	-	4	-	-	2	3	-	0,538
53	1	-	-	-	9	-	1	0,538
54	-	-	10	-	-	11	-	0,542
55	1	3	2	6	2	4	1	0,542
56	1	1	2	5	9	-	2	0,543
57	-	-	4	-	-	4	-	0,546
58	-	-	5	-	-	4	1	0,546
59	1	-	-	-	7	-	1	0,547
60	2	1	1	2	6	2	1	0,548
61	-	-	5	1	-	4	-	0,548
62	3	3	2	6	2	5	1	0,551
63	-	2	5	-	-	6	1	0,552
64	1	3	2	6	2	2	1	0,552
65	1	1	1	1	6	1	1	0,552
66	1	-	5	2	-	4	-	0,553
67	1	1	1	1	5	1	1	0,558
68	1	-	2	-	9	-	1	0,559
69	-	-	5	1	1	4	1	0,559
70	1	3	2	6	2	1	1	0,559
71	-	-	5	-	-	4	-	0,559
72	2	-	5	2	-	4	-	0,566
73	2	-	-	-	7	-	1	0,567
74	1	2	3	5	6	-	2	0,567
75	-	-	8	-	-	9	-	0,568
76	1	3	2	5	2	1	1	0,568
77	1	1	1	1	2	4	3	0,569
78	3	1	2	-	5	5	1	0,570
79	3	-	-	-	-	4	1	0,572
80	2	1	-	-	7	-	1	0,577
81	1	1	1	1	5	1	2	0,578
82	1	3	2	4	2	1	1	0,579
83	-	-	-	-	-	1	1	0,582
84	3	-	1	-	-	4	1	0,584
85	3	1	2	-	2	4	1	0,587
86	1	1	1	-	4	1	1	0,587
87	2	-	-	-	6	-	1	0,588
88	-	-	-	1	-	-	1	0,591
89	2	3	6	1	11	2	2	0,592
90	3	1	1	-	-	4	1	0,593
91	4	1	2	-	2	5	1	0,598
92	-	-	-	-	2	-	1	0,599
93	1	1	1	1	1	1	1	0,601
94	6	2	2	3	-	4	1	0,601
95	3	1	2	-	5	5	1	0,602
96	2	3	6	1	9	2	2	0,604
97	2	-	1	-	6	-	1	0,604
98	1	3	2	3	1	1	3	0,605
99	3	1	2	-	-	4	1	0,606

kombinace	Počet základních prvků v kombinaci							CDF _K
	1	2	3	4	5	6	7	
100	2	2	2	1	2	4	4	0,609
101	3	2	2	-	-	4	1	0,616
102	1	1	1	-	4	1	2	0,616
103	2	1	1	-	6	-	1	0,617
104	1	3	2	3	-	1	2	0,617
105	1	1	1	1	-	1	1	0,623
106	1	3	2	2	-	1	1	0,629
107	2	1	1	-	4	-	-	0,631
108	2	2	2	-	-	3	1	0,631
109	2	3	6	1	3	3	2	0,636
110	1	1	1	-	3	1	2	0,636
111	3	1	1	-	-	6	1	0,641
112	2	3	2	-	-	3	1	0,644
113	1	2	1	-	3	1	2	0,651
114	1	3	2	2	-	1	2	0,653
115	-	3	1	2	-	7	7	0,655
116	1	2	1	-	5	-	2	0,656
117	2	3	3	-	-	3	1	0,660
118	1	-	-	-	2	-	1	0,665
119	1	1	1	1	1	-	1	0,665
120	1	2	2	1	-	1	1	0,667
121	-	-	-	1	-	-	2	0,672
122	-	4	3	-	2	-	-	0,674
123	2	3	4	-	-	3	1	0,675
124	-	-	-	-	1	-	1	0,681
125	1	2	1	-	2	1	2	0,681
126	1	3	2	1	-	1	1	0,686
127	2	4	4	-	-	3	1	0,688
128	1	2	1	1	1	-	1	0,689
129	3	-	-	-	3	-	1	0,700
130	3	4	4	-	-	3	1	0,706
131	1	3	3	1	-	1	1	0,707
132	-	-	-	-	-	1	2	0,712
133	1	3	1	1	1	-	1	0,712
134	2	2	2	-	1	1	-	0,713
135	3	2	2	-	-	2	1	0,716
136	1	3	2	-	2	1	2	0,718
137	2	-	-	-	2	-	1	0,720
138	-	-	-	-	-	1	3	0,726
139	2	3	3	1	-	1	1	0,732
140	-	-	-	1	-	-	3	0,737
141	1	3	2	1	1	-	1	0,737
142	1	2	2	-	-	1	-	0,738
143	-	-	1	-	-	2	5	0,740
144	3	2	2	1	1	-	-	0,746
145	2	4	3	1	-	1	1	0,747
146	1	-	-	-	3	-	4	0,754
147	2	4	4	1	-	1	1	0,763
148	-	-	1	-	-	2	6	0,766
149	1	3	2	1	1	-	2	0,767

